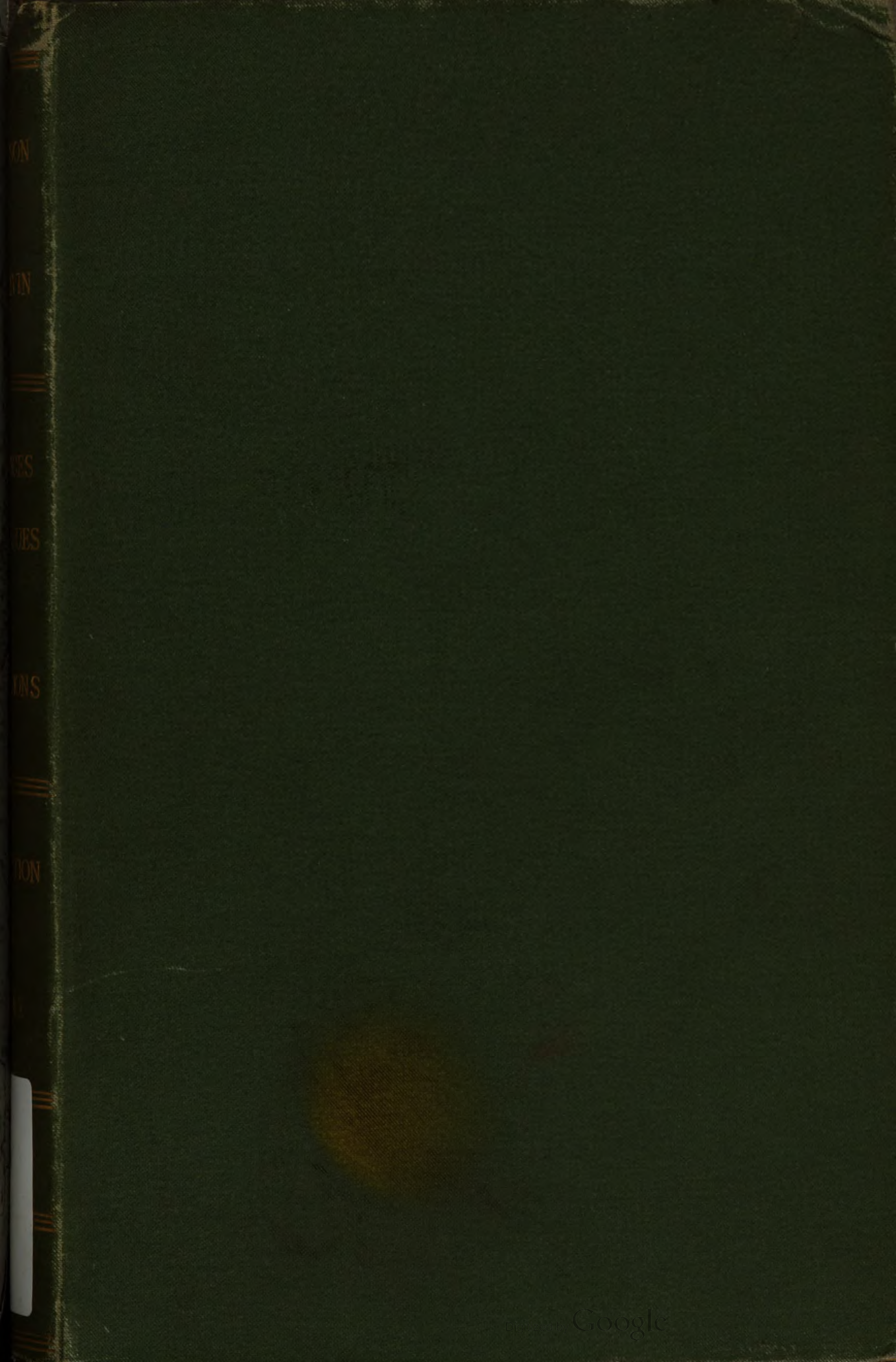






CONFÉRENCES SCIENTIFIQUES

ET

ALLOCUTIONS.


ΑΕΙ Ο ΘΕΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΕΙ

SIR WILLIAM THOMSON (LORD KELVIN),
L.L.D., F.R.S., F.R.S.E., etc., Professeur de Philosophie naturelle à l'Université de Glasgow,
Membre du collège Saint-Pierre, à Cambridge.

CONFÉRENCES SCIENTIFIQUES

ET

ALLOCUTIONS

TRADUITES ET ANNOTÉES SUR LA DEUXIÈME ÉDITION

Par P. LUGOL,
Agrégé des Sciences physiques, Professeur au Lycée de Pau.

AVEC DES

EXTRAITS DE MÉMOIRES RÉCENTS DE SIR W. THOMSON ET QUELQUES NOTES

Par M. BRILLOUIN,
Maître de Conférences a l'École Normale.

CONSTITUTION DE LA MATIÈRE.

PARIS,
GAUTHIER-VILLARS ET FILS, IMPRIMEURS-LIBRAIRES
DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
Quai des Grands-Augustins, 55.

1893

AVERTISSEMENT.

Le petit Volume que nous présentons au public français est formé pour la plus grande partie par la traduction des Conférences relatives à la constitution de la matière réunies dans le Tome premier des *Conférences scientifiques et Allocutions* de Sir W. Thomson. Il nous a paru intéressant de faire précéder chaque Conférence d'un sommaire, et d'y ajouter quelques notes soit de discussion, soit d'explication. Les notes sans signature, ou suivies des initiales W. T. sont celles de la deuxième édition anglaise. Les autres notes sont distinguées par les initiales P. L. et M. B. de chacun de nous.

Dans ces Conférences, Sir W. Thomson est très bref sur une des créations les plus originales de son esprit inventif, l'éther gyrostatique, ce milieu dont toute l'énergie est cinétique et dont les propriétés satisfont mieux que celles d'un milieu élastique ordinaire à ce qu'exigent l'Optique et l'Électricité. La plupart des compléments de cette édition française sont consacrés à ce sujet; nous avons quelquefois résumé, et surtout traduit tout ce qui nous a paru intelligible sans calculs dans les nombreux Mémoires de Sir W. Thomson sur cette question. Les autres compléments sont relatifs à la théorie de la dispersion, à la théorie de l'élasticité de la matière et à la définition de la température absolue. Enfin deux Notes de l'un de nous traitent des unités électriques et de la construction de la surface capillaire de révolution.

P. L. M. B.

PRÉFACE DE LA PREMIÈRE ÉDITION.

Peu de temps après que j'eus fait ma conférence *Sur la Capillarité*, à l'Institution Royale, en janvier 1886, M. Lockyer me suggéra qu'il pourrait être bon de rendre cette conférence plus facilement et plus commodément accessible au public qu'elle ne peut l'être dans les *Transactions of the Royal Institution*, ou dans les pages de *Nature*. Des dispositions furent prises en conséquence pour publier, dans la *Bibliothèque* de *Nature*, un petit Volume contenant la conférence *Sur la Capillarité*, jointe à divers autres articles se rapportant au même sujet.

Pendant que les premières feuilles de ce Livre étaient à l'impression, l'idée me vint de réunir, pour les publier de nouveau, quelques autres conférences et allocutions d'un caractère populaire, que j'avais prononcées de temps à autre et qui ne pouvaient pas trouver une place convenable dans mes *Reprint of Mathematical and Physical Papers*, publiés en ce moment par l'Imprimerie de l'Université de Cambridge. Après examen, on se décida à changer le caractère du Volume projeté *Sur la Capillarité*, à en augmenter les dimensions et à en faire le premier d'une série de trois Volumes qui constitueront une réimpression de toutes mes conférences et de toutes mes allocutions publiques.

L'ordre dans lequel les divers articles sont placés, dans ce Volume et dans ceux qui suivront, est, d'une manière générale, réglé d'après les sujets traités. Ainsi ce Volume contient les conférences relatives à la constitution intime de la ma-

tière. Le deuxième Volume comprendra les questions liées à la Géologie, et dans le troisième il sera traité principalement des phénomènes de l'Océan et de sujets marins.

Les conférences sont imprimées dans la forme même qu'elles avaient à l'origine; les seules modifications sont de légers changements de mots introduits dans un petit nombre de cas en vue d'augmenter la clarté.

William THOMSON.

Glasgow, à l'Université, 21 décembre 1888.

PRÉFACE DE LA DEUXIÈME ÉDITION.

Grâce à la bienveillante autorisation de Lord Rayleigh, on a placé dans cette seconde édition, comme appendice à l'article sur l'*Attraction capillaire*, le Mémoire récemment publié, dans lequel il décrit la mesure des quantités d'huile nécessaires pour arrêter les mouvements du camphre sur l'eau. Ce travail se rattache aussi très étroitement à l'article sur la *Grandeur des atomes* qui se trouve dans une autre partie du Volume.

J'ai ajouté, à l'article intitulé *Acheminement vers une théorie cinétique de la matière,* un Appendice qui pourra être lu avec intérêt et peut-être avec quelque plaisir, par ceux qui auraient pu croire que la difficulté soulevée dans cet article obscurcissait la théorie cinétique des gaz.

Le troisième Volume promis dans la préface de la première édition du premier Volume sera publié, pour des raisons d'imprimerie, avant le deuxième Volume. Il est maintenant complètement composé, et va paraître incessamment. Le deuxième Volume sera, je l'espère, publié dans un an ou deux.

William THOMSON.

Glasgow, à l'Université, 16 février 1891.

CONFÉRENCES SCIENTIFIQUES

ET

ALLOCUTIONS.

I.

L'ATTRACTION CAPILLAIRE.

CONFÉRENCE DU VENDREDI SOIR, FAITE DEVANT L'INSTITUTION ROYALE LE 29 JANVIER 1886 (*Proc. Roy. Inst.*, t. XI, 3e Partie).

La loi de Newton et l'attraction capillaire; théorie de Laplace et de Gauss; théorie moléculaire. — Travail des forces moléculaires. — Assimilation de la surface qui limite une masse liquide à une membrane contractile. — Équilibre d'une masse liquide isolée. — Équilibre de deux masses liquides non miscibles. — Équilibre d'une masse liquide supportée par un solide. — Mesures des constantes capillaires. — Quelques effets curieux de la tension capillaire.

La pesanteur de la matière est connue depuis des milliers d'années, depuis qu'il y a sur la terre des hommes et des philosophes; mais personne, avant que Newton eût découvert la gravitation universelle, n'avait soupçonné ou imaginé que la pesanteur fût due à une action à distance entre deux portions de matière. Les attractions et les répulsions électriques, les attractions et les répulsions magnétiques étaient familières aux naturalistes et aux philosophes depuis deux ou trois mille ans; Gilbert, en montrant que l'action de la terre, comparable à celle d'un grand aimant, est la cause déterminante de l'orientation vers le nord de l'aiguille de la

boussole, a étendu les notions que l'on possédait relativement aux distances auxquelles les aimants peuvent exercer une action sensible. Mais ni lui, ni aucun autre, n'avait émis l'idée que le poids fût la résultante d'atractions mutuelles entre toutes les parties du corps pesant et toutes les parties de la terre, et il n'était venu à l'esprit de personne de concevoir que les diverses portions de la matière, à la surface de la terre, ou même ces masses plus élevées en dignité, qu'on nomme les corps célestes, s'attirent les unes les autres. Newton ne donna lui-même aucune preuve fondée soit sur l'observation, soit sur l'expérience, de l'attraction mutuelle de deux corps qui auraient tous les deux une masse moindre que celle de la Lune. La moins considérable des actions de gravitation comprises dans les observations qui servent de fondement à sa théorie est celle de la Lune sur les eaux de la mer, action qui donne naissance aux marées; mais son induction l'ayant amené à conclure que le poids d'une masse de matière, à la surface de la terre, est la résultante des attractions de toutes les parties de la terre agissant en raison inverse du carré des distances, on put considérer comme fort probable que des portions de matière séparées par des distances de quelques mètres ou quelques centimètres s'attirent réciproquement suivant la même loi; et la magnifique expérience de Cavendish a vérifié cette conclusion. Arrivons maintenant à notre sujet. Cette attraction entre une particule quelconque de la matière d'un corps et une particule quelconque de la matière d'un autre corps continue-t-elle à varier en raison inverse du carré de la distance quand la distance des points les plus voisins des deux corps est réduite à un centimètre (l'expérience de Cavendish ne le démontre pas, mais le rend très probable), à un cent-millième, un cent-millionième de centimètre? Je plonge mon doigt dans cette cuvette pleine d'eau; vous constatez l'existence d'une force attractive entre mon doigt et la goutte qui y est suspendue, de même qu'entre les particules d'eau situées de part et d'autre d'un plan horizontal quelconque coupant la goutte. Ces forces sont des millions de fois plus grandes que celles qu'on calculerait d'après la loi de Newton, en supposant l'eau parfaitement homogène.

Donc, ou bien ces forces attractives doivent, pour de très faibles distances, croître beaucoup plus rapidement que ne l'indiquerait la loi de Newton, ou bien la substance de l'eau n'est pas homogène. Nous savons maintenant qu'elle n'est pas homogène. La théorie newtonienne de la gravitation n'est pas plus certaine pour nous aujourd'hui que ne l'est la théorie atomique ou moléculaire en Chimie et en Physique; du moins quant à son affirmation d'une hétérogénéité dans la structure intime de la matière, qui apparaît comme homogène à nos sens et à l'examen direct au moyen de nos instruments les plus délicats. D'après cela, à moins d'avoir reconnu l'impossibilité d'expliquer la cohésion et l'attraction capillaire par l'hétérogénéité et la loi de Newton, nous ne sommes pas obligés d'en chercher l'explication dans une force s'écartant de la loi de gravitation newtonienne. Dans une communication faite, il y a vingt-quatre ans, à la Société Royale d'Édimbourg ([1]), j'ai montré que l'hétérogénéité peut suffire à rendre compte des forces de cohésion, quelque grandes qu'elles soient, sous la seule condition d'attribuer une assez grande densité aux molécules dans la structure hétérogène.

Cependant il semble qu'on ne puisse arriver à rien de satisfaisant ou de très intéressant au point de vue mécanique, si on essaye de développer cette théorie sans tenir compte des mouvements moléculaires que nous savons être inhérents à la matière, et qui constituent sa chaleur. Mais, en ce qui concerne les principaux phénomènes d'attraction capillaire, il suffit de savoir qu'on arrive forcément à la même action résultante au total, soit par la théorie moléculaire complète, soit en supposant l'eau et les solides qui la touchent entièrement homogènes jusque dans leurs plus petites parties, et soumis à des forces attractives suffisamment puissantes entre des particules de matière extrêmement voisines, mais tout à fait insensibles entre des particules de matière placées à des distances sensibles. A la vérité, quelles que soient les vues

---

([1]) *Note sur la gravité et la cohésion* (*Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, t. IV, 21 avril 1862). Cette Note est réimprimée en entier dans l'Appendice B au présent article.



que nous puissions adopter sur les molécules, ou que des générations encore à naître puissent adopter après nous, dans le but d'expliquer la nature essentielle de l'action, cette idée d'une attraction insensible à des distances sensibles est la clef de la théorie de l'attraction capillaire; c'est à Hawksebee ([1]) que nous la devons. Laplace ([2]) l'a reprise et complètement développée, au point de vue mathématique, d'une admirable manière. Une partie de la théorie qu'il a laissée imparfaite, l'action d'un solide sur un liquide et l'action mutuelle entre deux liquides, a été complétée par Gauss au point de vue dynamique ([3]), et la dernière main a été mise à la théorie mathématique par Neumann ([4]), quand il a établi pour les liquides une règle correspondant à celle qu'avait donnée Gauss pour les angles de contact entre les liquides et les solides.

Gauss, manifestant son enthousiasme pour l'œuvre de Laplace, adopte la même hypothèse fondamentale d'une attraction qui ne serait sensible qu'à des distances insensibles; et tout en se proposant comme but principal de compléter la partie de la théorie laissée inachevée par son prédécesseur, il a traité de nouveau le problème dynamique avec une remarquable perfection, en le fondant entièrement sur le principe de ce que nous appelons aujourd'hui l'énergie potentielle. Aussi, bien que les formules mathématiques au moyen desquelles il a exprimé ses idées soient à peine moins effrayantes en apparence que celles de Laplace, il est très facile de les traduire dans un langage qui rendra la théorie tout entière parfaitement intelligible pour les personnes qui se croient incapables de comprendre des intégrales sextuples. Plaçons-nous pour plus de commodité au centre de la terre, afin de ne pas être troublés par la pesanteur. Prenons main-

---

([1]) *Transactions of the Royal Society*, t. XXVI, XXVII, 1709-1713; ou édition abrégée par le Dr Hutton et autres, t. V, p. 464 et suivantes.

([2]) *Mécanique céleste*, Supplément au Xe Livre, publié en 1806; et aussi *Supplément à la théorie de l'action capillaire*, formant un second Supplément au Xe Livre. (*OEuvres complètes de Laplace*, t. IV, p. 349 et 419.)

([3]) *Principia generalia theoriæ figuræ fluidorum in statu equilibrii* (Göttingen, 1830) ou *OEuvres*, t. V, p. 29 (Göttingen, 1887).

([4]) M. F.-E. Neumann.

tenant deux masses d'eau, et donnons à la surface de chacune d'elles, sur une certaine étendue que nous appellerons A pour l'une et B pour l'autre, une forme telle que, si nous les plaçons en contact, elles s'adaptent parfaitement l'une à l'autre en tous les points de ces surfaces. Pour nous garantir de toute perturbation pendant la manipulation de ces masses d'eau hypothétiques, rendons-les parfaitement rigides pour un instant, sans, toutefois, faire subir aucun changement à leurs attractions mutuelles. Approchons-les maintenant l'une de l'autre jusqu'à ce que les deux surfaces A et B soient distantes de un quarante-millième de centimètre, ou 250 micro-millimètres (environ la moitié de la longueur d'onde de la lumière verte). A une aussi grande distance, l'attraction est tout à fait insensible; nous pouvons être assurés qu'elle ne diffère que par une faible fraction de la force d'attraction excessivement petite que l'on calculerait en s'appuyant sur la loi de Newton, dans l'hypothèse d'une uniformité parfaite de la densité de chacun des corps attirants. Les phénomènes bien connus des bulles et des pellicules aqueuses qui mouillent les solides montrent d'une manière tout à fait certaine que l'attraction moléculaire ne devient sensible que lorsque la distance est bien inférieure à 250 micro-millimètres. De l'examen de ces phénomènes, Quincke (¹) est arrivé à conclure que l'attraction moléculaire devient sensible à une distance d'environ 50 micro-millimètres. Cette conclusion est confirmée d'une manière frappante par cette découverte très importante de Reinold et Rücker (²), à savoir que la pellicule noire, qui se forme toujours avant la rupture d'une bulle de savon soustraite à toute agitation, a une épaisseur uniforme ou sensiblement uniforme de 11 ou 12 micro-millimètres environ. La formation brusque et la stabilité de la pellicule noire démontrent une proposition d'une importance capitale dans la théorie moléculaire : la tension de la pellicule, qui est sensiblement constante quand son épaisseur dépasse 50 micro-millimètres, diminue jusqu'à un minimum,

(¹) *Pogg. Ann. der Phys. und der Chem.*, t. CXXXVII, 1869.
(²) *Proc. Roy. Soc.*, 21 juin 1877, et *Trans. Roy. Soc.*, 19 avril 1883.

et commence à croître de nouveau quand l'épaisseur est réduite à 10 micro-millimètres. Il ne paraît pas possible d'imaginer, pour les forces qui s'exercent entre les différentes portions de la pellicule supposée homogène, une loi quelconque permettant d'expliquer ce fait; nous sommes obligés de conclure qu'il est dû à une hétérogénéité moléculaire. Puisque la théorie fondée sur l'homogénéité et la continuité de la matière est ainsi infirmée par l'observation, et que son hypothèse d'une attraction croissant plus rapidement que l'attraction newtonienne quand la distance tombe au-dessous de 50 micro-millimètres, est reconnue insuffisante, ne pouvons-nous pas aller plus loin, et affirmer l'inutilité de cette hypothèse d'une attraction échappant à la loi newtonienne de la variation continue de la force en raison inverse du carré de la distance depuis un millionième de micro-millimètre jusqu'à la distance de l'étoile la plus reculée, ou de la portion de matière la plus éloignée dans l'univers? et, jusqu'à ce que nous voyions comment la gravité elle-même peut être expliquée, comme Newton et Faraday pensaient qu'elle peut l'être, par une action continue d'un milieu matériel séparant ou entourant les corps, ne pouvons-nous pas nous contenter d'expliquer provisoirement l'attraction capillaire par la simple attraction newtonienne dont l'intensité serait accrue grâce à des molécules très denses mobiles au voisinage les unes des autres, et dont l'agrégation constituerait une masse de liquide ou de solide?

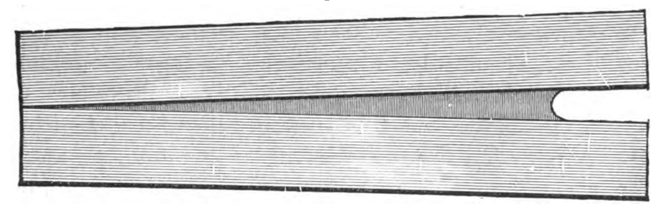
Mais pour le moment, et pour le reste de cette soirée, débarrassons-nous de toute idée de discontinuité moléculaire, et ne nous occupons que de la théorie qui suppose purement et simplement la matière homogène et continue, la théorie de Laplace et de Gauss; revenons à nos deux masses d'eau solidifiées, que nous avons laissées éloignées l'une de l'autre de 250 micro-millimètres. Les prenant dans mes deux mains, je les rapproche de plus en plus, jusqu'à ce qu'elles se touchent sur toute l'étendue des surfaces A et B. Elles commencent à s'attirer l'une l'autre avec une force qui peut être à peine sensible à mes mains quand leur distance est de 50 micro-millimètres, ou est même réduite à

10 micro-millimètres, mais qui certainement devient sensible quand la distance devient 1 micro-millimètre ou une fraction de micro-millimètre, et qui acquiert une valeur énorme, des centaines ou des milliers de kilogrammes, avant qu'elles arrivent au contact parfait. Je suppose que l'aire de chacune des surfaces opposées soit de quelques centimètres carrés. Pour fixer les idées, je vais supposer qu'elle est exactement de 30 centimètres carrés. Si mon sens de la force était assez délié pour faire des mesures, je trouverais que le travail accompli par l'attraction des deux masses d'eau solidifiées, quand j'écarte simultanément mes deux mains, est juste de 4,5 grammes-centimètres. La force capable de produire ce travail, si elle était restée constante pendant le parcours de 50 micro-millimètres (5 millioniêmes de centimètre) aurait dû être de 900000^{gr}, c'est-à-dire $\frac{9}{10}$ de tonne. Mais, en réalité, le travail est accompli par une force qui croît depuis une valeur très faible à la distance de 50 micro-millimètres, jusqu'à une valeur inconnue très grande. Elle peut atteindre un maximum avant le contact parfait, et commencer alors à diminuer, ou bien croître de plus en plus jusqu'au contact, nous ne pouvons nous prononcer à ce sujet. Quelle que puisse être la loi de variation de la force, il est certain que, dans une petite partie de l'intervalle, cette force est de beaucoup supérieure à une tonne. Il est possible qu'elle doive être énormément plus grande qu'une tonne, pour donner naissance à ce travail de 4,5 grammes-centimètres, accompli dans un espace de 50 micro-millimètres.

Varions maintenant un peu les circonstances. Je prends mes deux masses d'eau solidifiées, et les amène à se toucher par deux points correspondants des bords des surfaces A et B, en les maintenant largement écartées partout ailleurs (voir *fig.* 1). Le travail accompli par mes mains dans cette opération est infiniment petit. Maintenant, sans altérer en rien la loi de la force attractive, permettons à une mince couche de cette eau solidifiée de redevenir fluide sur toute l'étendue de chacune des surfaces A et B; vous voyez exactement ce qui se passe. Les fragments de matière que je tiens dans mes mains ne sont pas ces masses hypothétiques

d'eau solidifiée. Ce sont deux morceaux de verre, dont les surfaces A et B ont été parfaitement nettoyées, et mouillées sur toute leur étendue par de minces lames d'eau. Ce que vous voyez se produire est juste ce qui se produirait si notre expérience réalisait exactement les conditions de notre hypothèse idéale. Imaginez donc que vous ayez réellement sous les yeux deux masses d'eau entièrement rigides, à l'exception d'une mince pellicule sur chacune des surfaces A et B, qui doivent être placées l'une sur l'autre. Souvenez-vous aussi que l'Institution Royale, dans laquelle vous êtes rassemblés, a été pour la circonstance transportée au centre de la terre, de sorte que nous ne sommes en aucune façon

Fig. 1.



troublés par la pesanteur. Vous voyez que nous ne sommes gênés par aucun écoulement vers le bas de ces membranes liquides; mais je ne devrais pas dire *vers le bas,* il n'y a ici ni haut, ni bas; elles ne coulent pas le long des surfaces vers la table, tout au moins vous pouvez imaginer qu'elles ne coulent pas. Je fais maintenant tourner l'un de ces deux morceaux de matière ou tous les deux jusqu'à ce qu'ils soient assez près du contact sur toute l'étendue des surfaces A et B, pour que tout l'intervalle se remplisse d'eau. Mon sens du toucher, capable de mesurer les grandeurs, m'apprend qu'un travail exactement égal à 4,5 grammes-centimètres vient d'être de nouveau accompli; cette fois, cependant, ce n'a pas été par une force très grande dans un intervalle de moins de 50 micro-millimètres, mais par une force très petite agissant tout au travers du grand espace nécessaire pour retourner les lames ou les replier l'une sur l'autre, comme vous l'avez vu et le voyez encore. Nous savons, en effet, d'après le prin-

cipe élémentaire du travail dans un système à fonction de forces, que le travail produit doit être le même dans les deux cas, soit que nous amenions directement les deux corps l'un vers l'autre, soit que nous les fassions se rejoindre en mettant d'abord deux points en contact, et les repliant alors l'un sur l'autre; et la faculté mensuratrice de mon toucher m'a simplement montré dans ce cas particulier ce que nous savons tous devoir être vrai théoriquement, dans tous les cas où l'on tend de plusieurs façons différentes vers un même état final, en partant d'un même état initial.

En repliant ainsi les corps l'un sur l'autre, dans ce second cas, nous avons diminué de 60 centimètres carrés la surface de l'eau. Il est facile de voir que la même diminution de la surface de l'eau, de quelque manière qu'on la détermine, doit toujours donner la même quantité de travail, à condition que le rayon de courbure en tout point de la surface soit cent ou deux cents fois plus grand que la distance à laquelle l'attraction moléculaire est sensible; ou, comme on peut le dire pratiquement, à condition que le rayon de courbure soit partout supérieur à 5000 micro-millimètres (c'est-à-dire à $\frac{1}{200}$ de millimètre). Nous voyons, d'après cela, qu'à chaque diminution de la surface de 1 centimètre carré correspond un travail de $\frac{4,5}{60}$ (ou $\frac{3}{40}$) de gramme-centimètre. C'est précisément le résultat auquel nous aurions été conduits en supposant les molécules d'eau dépourvues de toute action attractive mutuelle, et la masse recouverte sur toute sa surface d'une membrane contractile infiniment mince douée d'une force de contraction d'une intensité uniforme et égale à $\frac{3}{40}$ de gramme, ou 75 milligrammes, par centimètre de longueur.

Il est maintenant commode de conserver notre membrane idéale, et d'abandonner l'idée qui, d'après la manière dont nous pouvons actuellement nous figurer les actions moléculaires, répond le mieux à la réalité des choses, c'est-à-dire l'idée d'une attraction mutuelle entre les différentes parties du liquide. Mais, je vous en conjure, ne prenez pas l'habitude paradoxale de considérer la membrane superficielle comme autre chose qu'un moyen idéal d'établir l'effet résultant des attractions mutuelles entre les différentes portions du liquide.

Considérez, maintenant, une des masses d'eau solidifiées par la pensée, ou, si vous voulez, les deux masses réunies ensemble pour en former une. Souvenez-vous que vous êtes au centre de la terre. Qu'arrivera-t-il si cette portion de matière placée dans l'air devant vous cesse subitement d'être rigide? Imaginez, comme je vous l'ai dit, qu'elle soit renfermée dans une membrane tendant à se contracter en tous ses points avec une force de $\frac{3}{40}$ de gramme ou 75 milligrammes par centimètre de longueur. Cette enveloppe contractile va évidemment exercer la pression la plus forte aux endroits où la convexité est la plus grande. Un théorème très élémentaire de Mathématiques nous apprend que, sur la surface convexe rigide que vous voyez, on obtiendra la valeur de la pression par centimètre carré en multipliant la somme [1] des courbures dans deux sections normales rectangulaires, par la valeur de la force par centimètre de longueur. Partout où la surface est concave, l'effet de la tension superficielle est de l'attirer vers le dehors, c'est-à-dire, en langage mathématique, d'exercer vers l'intérieur une pression négative. Maintenant, supposez un instant que la rigidité disparaisse et que le morceau de verre que vous voyez, toujours soustrait à l'action de la pesanteur, devienne de l'eau. L'effet immédiat de ces pressions inégales s'exerçant sur sa surface sera de le mettre en mouvement. S'il était un fluide parfait, il se mettrait à vibrer indéfiniment avec des vibrations violentes et irrégulières, étant donnée une forme initiale aussi grossière que celle que je tiens dans ma main. Mais l'eau, comme tous les autres liquides, est en réalité visqueuse; par conséquent, les vibrations de cette masse de matière s'amortiront graduellement, et elle finira par prendre et conserver la forme sphérique; elle sera légèrement échauffée grâce au travail exécuté par les forces d'attraction mutuelle qui l'ont mise en mouvement à partir de sa forme initiale. Le travail accompli par ces forces pendant que le corps est passé d'une forme à une autre est proportionnel à la diminution de l'aire de la surface totale; et puisqu'il n'y a pas ici de per-

---

[1] Dorénavant et pour abréger, j'appellerai simplement cette somme *la courbure de la surface* en chaque point.

turbation due à la gravité, ou à quelque autre corps solide ou liquide, la forme d'équilibre est cette figure, la sphère, qui, pour un volume donné de matière, présente la plus petite surface possible.

J'ai calculé la période de vibration d'une sphère d'eau (1) (une goutte de rosée!) et trouvé qu'elle est égale à $\frac{1}{4} a^{\frac{3}{2}}$, si a est le rayon mesuré en centimètres; donc

Pour un rayon de	$\frac{1}{4}$	de cm. la période est de	$\frac{1}{32}$	de seconde
»	1	»	$\frac{1}{4}$	»
»	2,54	»	1	»
»	4	»	2	»
»	16	»	16	»
»	36	»	54	»
»	1407	»	13200	»

La dynamique du sujet, en ce qui concerne un seul liquide, est contenue tout entière dans les raisonnements mathématiques sans symboles que je vous ai exposés. Vingt pages couvertes d'intégrales sextuples ne nous en apprendraient pas plus long.

Jusqu'à présent nous n'avons considéré que des attractions mutuelles entre deux parties ou deux portions d'un seul et même liquide, l'eau par exemple. Considérons maintenant deux liquides différents, l'eau et le bisulfure de carbone par exemple. Recommençons pour eux exactement ce que nous avons fait pour les deux masses d'eau. Je n'ai pas besoin de reprendre toute la série des opérations; le résultat est évident. Le travail accompli en amenant directement les deux corps à se toucher par la surface considérée de 30 centimètres carrés est égal à 30 fois l'excès de la somme des tensions superficielles respectives des deux liquides sur la tension de la surface de séparation. *Donc, la tension par unité de surface de la surface de séparation est égale à l'excès de la somme des tensions superficielles respectives des deux liquides sur le travail accompli en réunissant les deux corps de telle manière qu'ils*

---

(1) *Voir* un Mémoire de lord Rayleigh dans les *Proc. Roy. Soc.*, n° 196, 5 mai 1879.

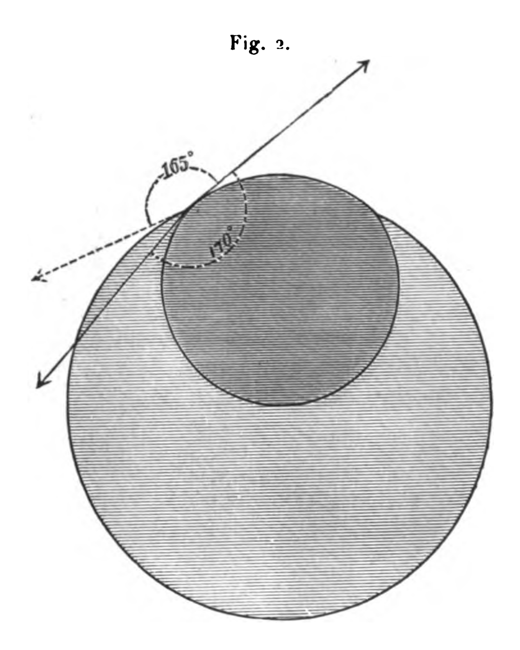
s'appliquent l'un sur l'autre dans l'étendue d'une unité de surface. Dans le cas particulier de deux corps de même nature amenés au contact parfait, la tension de la surface de séparation doit être nulle, et dès lors le travail accompli en les appliquant l'un sur l'autre, dans l'étendue d'une unité de surface, doit être exactement égal au double de la tension superficielle; c'est le cas que nous avons considéré d'abord.

Si le travail accompli dans le cas de deux liquides différents, en les amenant au contact sur une faible étendue, surpasse la somme des tensions superficielles, la tension de la surface de séparation est négative. Il en résulte un plissement instantané de cette surface, prélude de la diffusion, qui se poursuit à partir de ce moment par un mécanisme bien connu.

Considérons maintenant l'attraction mutuelle entre un solide et un liquide. Choisissons une certaine surface sur le solide, et donnons au préalable à une portion de la surface du liquide une forme telle qu'elle puisse s'y adapter. Amenons maintenant le liquide, que nous supposons rigide pour le moment, en contact avec le solide par cette surface. La quantité dont le travail par unité de surface de contact est inférieur à la tension superficielle du liquide est égale à la tension de la surface de contact du liquide et du solide. Si le travail par unité de surface est exactement égal à la tension de la surface libre du liquide, la tension de la surface de séparation est nulle. Dans ce cas, la surface du liquide, lorsqu'il y a équilibre au point de jonction du liquide et du solide, coupe à angle droit celle du solide. L'angle des surfaces libres du liquide et du solide est aigu ou obtus suivant que la tension de la surface de séparation est positive ou négative, son cosinus étant égal au quotient de la tension de la surface de séparation par la tension de la surface libre. La plus grande valeur que puisse avoir la tension de la surface de séparation, quand elle est positive, est évidemment la tension de la surface libre, et elle n'atteint cette valeur limite que dans le cas, qui n'est pas purement statique, d'un liquide reposant sur un solide de grande conductibilité calorifique, maintenu à une température de beaucoup supérieure au point d'ébullition du liquide, comme dans les phénomènes bien connus sur lesquels l'at-

tention a été attirée par Leidenfrost et Boutigny ([1]). Il n'y a pas de limite analogue pour la valeur absolue de la tension de la surface de contact, quand elle est négative, mais cette valeur absolue doit être inférieure à la tension de la surface libre pour qu'il puisse y avoir équilibre le long d'une ligne de séparation entre le liquide et le solide. Si la tension de la surface de séparation changée de signe est exactement égale à la

Fig. 2.



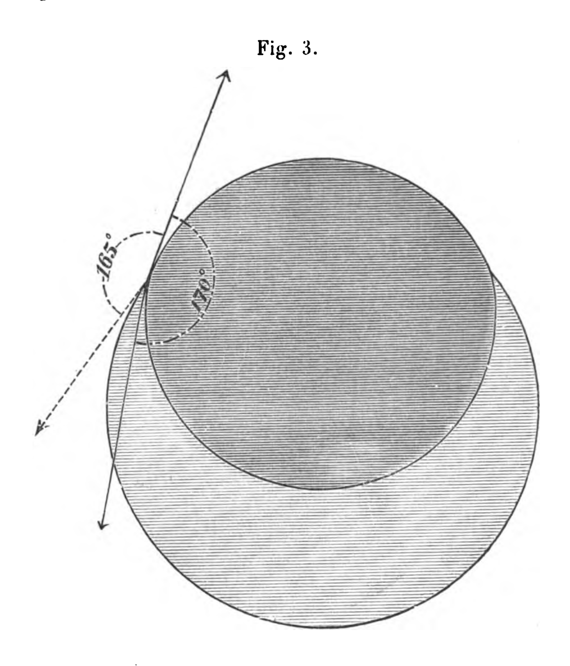
tension superficielle, l'angle des surfaces libres le long de la ligne de séparation est exactement 180°. Si la tension de la surface de séparation changée de signe est supérieure à la tension superficielle, le liquide coule sur toute la surface du solide, comme, par exemple, l'eau sur un plan de verre bien nettoyé. Si, quittant pour un moment le centre de la terre, nous nous supposons placés en quelque autre endroit dans

---

([1]) *Voir* E. Gossart, *Ann. Ch. et Ph.*, 6e série, t. XIX, p. 173, 1890, et *Journ. de Phys.*, 2e série, t. IX. M. B.

son intérieur ou à sa surface, nous trouvons que le liquide, en dépit de la pesanteur, s'élève le long de la partie supérieure du vase qui le contient, en formant une mince couche; il se sépare de la surface de contact du liquide et du solide de telle sorte que la surface libre fasse un angle de 180° avec la surface de la couche adhérente au solide au-dessus de la ligne qui limite cette surface libre. C'est le cas de l'eau

Fig. 3.

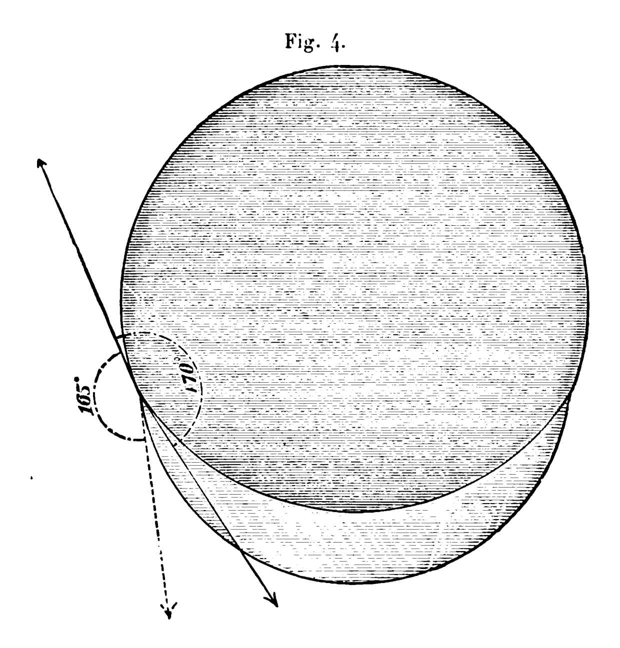


contenue dans un vase de verre, ou en contact avec un morceau de verre de forme quelconque, à la condition que la surface en soit parfaitement nettoyée.

Lorsque deux liquides non miscibles, c'est-à-dire deux liquides pour lesquels la tension de la surface de séparation est positive, soustraits à l'action de la pesanteur (dans notre laboratoire favori au centre de la terre, par exemple), sont mis en contact et abandonnés à eux-mêmes, l'ensemble de leurs masses, après avoir exécuté des vibrations qui s'amortissent grâce à la viscosité, prend et conserve la forme sui-

vante : deux segments de surface sphérique qui se coupent constituent la limite extérieure des deux masses liquides, et un troisième segment de surface sphérique, passant par l'intersection des deux premiers, constitue la surface de séparation. Ces trois surfaces sphériques se rencontrent sous les mêmes angles que trois forces qui se feraient équilibre dans un plan, et dont les intensités seraient respectivement égales

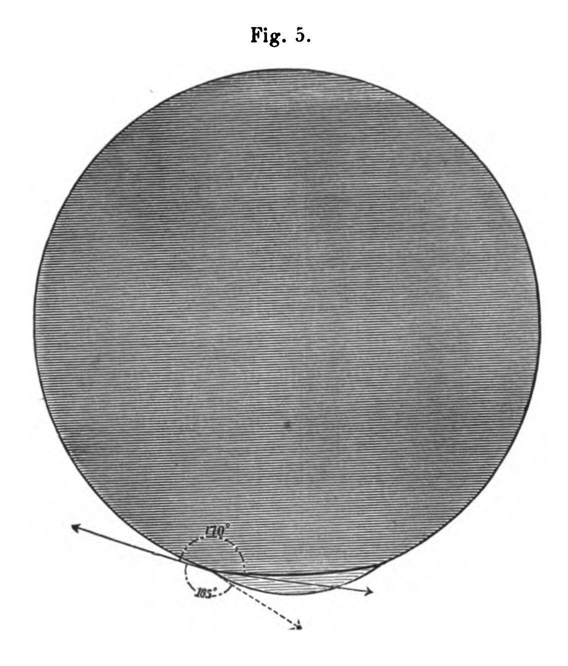
Fig. 4.



aux tensions superficielles des deux liquides et à la tension de leur surface de séparation. Les *fig.* 2 à 5 représentent ces formes dans le cas du bisulfure de carbone et de l'eau, pour différentes proportions des volumes des deux liquides. [Dans les figures, la partie sombre représente constamment l'eau (ou le sulfate de zinc).] Lorsqu'on donne le volume de chacun des liquides, et que les angles de raccordement des trois surfaces sont connus, le problème qui consiste à décrire les surfaces sphériques est parfaitement déterminé. C'est un problème géométrique assez intéressant.

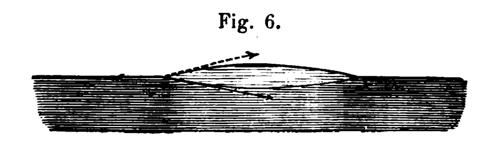
Abandonnons pour un moment notre laboratoire où la pesanteur ne s'exerce pas, et retournons à l'amphithéâtre de l'Institution Royale; amenons au contact nos deux masses de

Fig. 5.



liquide, comme je le fais dans ce flacon de verre; nous voyons un des liquides flotter sur l'autre, et nous pourrons étudier la forme prise par le liquide flottant dans différents cas, en

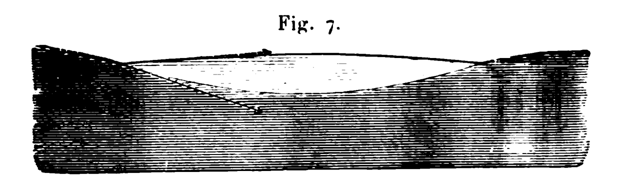
Fig. 6.



observant les phénomènes qui se produisent dans ces bouteilles et ces gobelets de verre; je vous les montre à une plus grande échelle dans ces deux dessins (*fig.* 6 à 8) qui représentent le sulfure de carbone flottant à la surface du sulfate

de zinc; dans ce cas (*fig.* 8) la goutte de sulfure de carbone a presque la grosseur maxima qui puisse encore flotter. Voici le flacon dont le contenu est représenté dans la *fig.* 8; vous allez voir qu'une très petite agitation verticale suffit à sub-

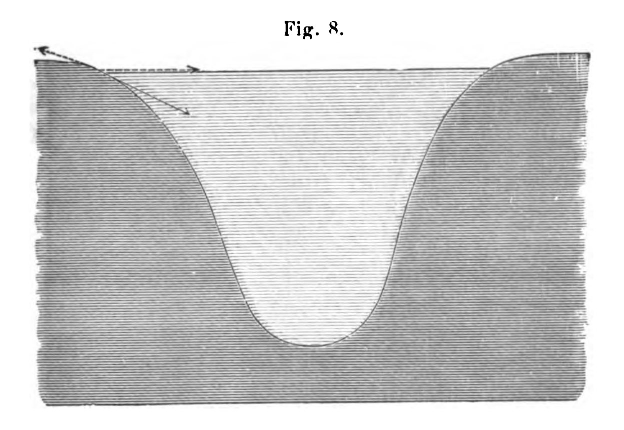
Fig. 7.



merger la masse de sulfure de carbone. La voici qui vient de s'enfoncer, et vous verrez, quand ses vibrations auront pris fin, que le sulfure de carbone a pris la forme d'une grosse sphère en suspension dans l'intérieur du sulfate de zinc.

Maintenant, nous souvenant que nous sommes retournés

Fig. 8.

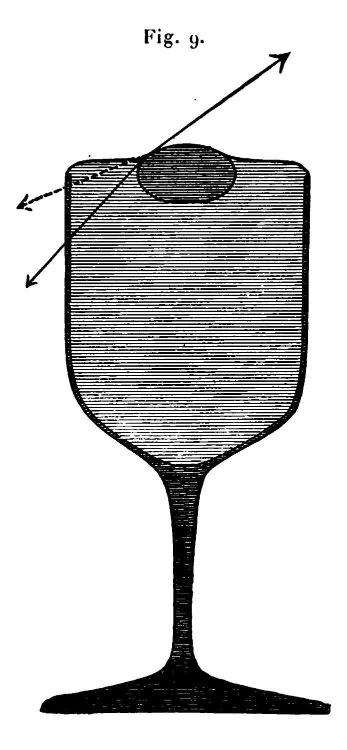


au centre de la terre et que la pesanteur ne nous gêne pas, supposons que le verre du flacon se transforme soudain en sulfate de zinc liquide; la masse va prendre la forme d'une sphère composée semblable à celle que montre ce dessin (*fig.* 3) et aura un rayon d'environ 8 centimètres. Si la sphère était uniquement formé de sulfate de zinc et avait ce diamètre, sa période de vibration serait environ de 5,5 secondes.

La *fig.* 9 montre une goutte de sulfate de zinc flottant dans un verre à boire complètement rempli de sulfure de carbone.

Dans l'observation des phénomènes que présentent deux liquides au contact, j'ai trouvé très commode d'employer le sulfate de zinc (dont la tension superficielle, d'après mes expériences, est égale à celle de l'eau) et le sulfure de car-

Fig. 9.



bone, parce que ces liquides ne se mélangent pas quand on les met en contact, et qu'au moins pendant un temps court il n'y a pas entre eux d'action chimique. De plus, on peut donner au sulfate de zinc une densité inférieure, égale ou supérieure à celle du sulfure de carbone, et donner au sulfure de carbone, au moyen de l'iode, une couleur pourpre plus ou moins foncée qui permet d'observer facilement des gouttes d'un de ces liquides flottant sur l'autre. Dans les trois flacons

qui sont maintenant devant vous le liquide clair est le sulfate de zinc; dans un des flacons, il a une densité inférieure à celle du sulfure de carbone, dans un autre, une densité égale, et dans le troisième, une densité supérieure; vous voyez comment, au moyen du sulfure coloré, tous les phénomènes relatifs à des gouttes restant au-dessus d'un liquide dans lequel elles ne peuvent se diffuser, ou flottant au sein de ce liquide, peuvent être observés, et, grâce à des dispositions convenables, évalués quantitativement.

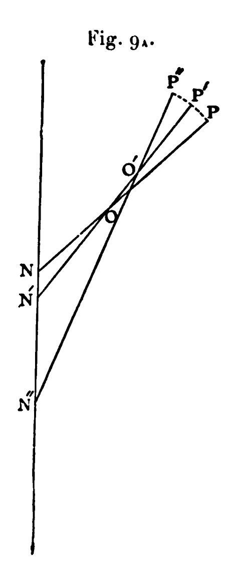
Lorsqu'un liquide soumis à l'action de la pesanteur est supporté par un solide, il prend une forme telle, que la différence des courbures de la surface libre à différents niveaux soit égale au quotient de la différence des niveaux par la tension superficielle évaluée en prenant pour unité le poids de l'unité de volume du liquide; et la surface libre du liquide rencontre la surface libre du solide sous un angle dont le cosinus est égal, comme on l'a dit plus haut, au quotient de la tension de la surface de séparation par la tension superficielle, ou sous un angle de 180° dans tous les cas où la tension de la surface de contact changée de signe dépasse la tension superficielle. L'équation de la surface d'équilibre et les conditions aux limites énoncées dans ce qui précède suffisent entièrement à en déterminer la configuration quand on donne le volume du liquide ainsi que la forme et les dimensions du solide. Quand je dis déterminer, je ne veux pas dire sans ambiguïté. Il peut naturellement y avoir un grand nombre de solutions du problème; par exemple, le solide peut présenter diverses cavités ou des saillies qui peuvent retenir tout ou partie du liquide, soit que ce liquide remplisse toutes les cavités ou quelqu'une d'entre elles, soit qu'il reste suspendu aux saillies ou à quelqu'une d'entre elles.

Quand le solide est symétrique autour d'un axe vertical, la figure prise par le liquide est celle d'un solide de révolution, et sa forme est déterminée par l'équation dont j'ai donné ci-dessus la traduction. Une solution générale de ce problème par les méthodes du Calcul différentiel et intégral dépasse les moyens de l'Analyse mathématique; mais voici une méthode graphique simple permettant d'obtenir ce qui

constitue une solution mathématique complète; cette méthode m'est venue à l'esprit il y a un grand nombre d'années.

Dessinons une ligne représentant l'axe de la surface de révolution. Cette ligne est verticale dans l'application qui va être faite, et dans le dessin nous l'appellerons *verticale*, de même que toutes celles qui lui seront parallèles; toute ligne perpendiculaire à celle-là sera appelée *horizontale*. La distance entre deux lignes horizontales dans le dessin sera appelée *différence de niveau*.

Fig. 9A.

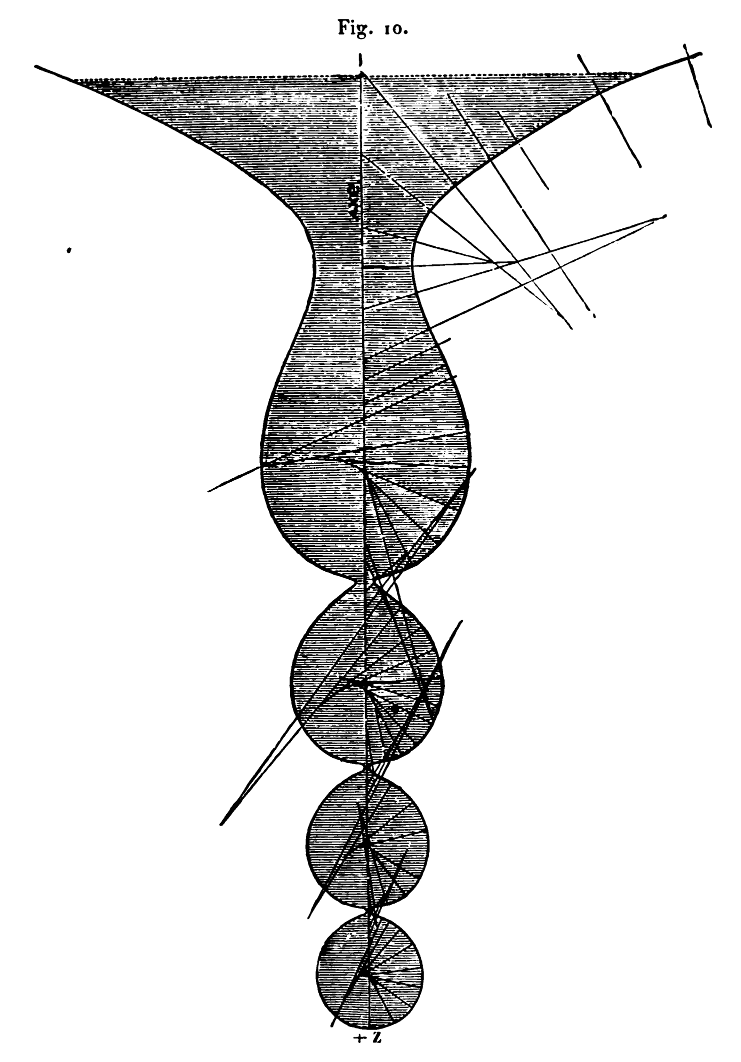


Par un point quelconque N de l'axe, tirez une ligne NP, coupant cet axe sous un angle quelconque (*fig.* 9A). D'un point O de la ligne NP, pris comme centre, décrivez un très petit arc de cercle PP', et soit N' le point où la ligne OP' coupe l'axe. Mesurez NP, N'P', et la différence de niveau entre P et P'. Désignant cette dernière par δ, et prenant a comme paramètre linéaire, calculez la valeur de

$$\frac{1}{\left(\frac{\delta}{a^2} + \frac{1}{\mathrm{OP}} + \frac{1}{\mathrm{NP}} - \frac{1}{\mathrm{N'P'}}\right)}.$$

Prenez une ouverture de compas égale à cette longueur, puis, plaçant en P′ la pointe munie du crayon, placez l'autre pointe

Fig. 10.

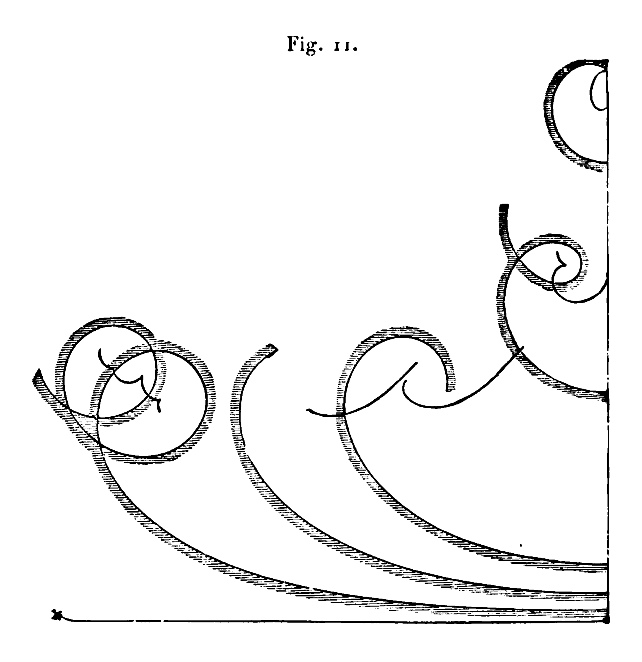


en O′ sur la ligne P′N′, et de O′ comme centre, décrivez un petit arc P′P″. Continuez la construction en suivant la même

règle, et les très petits arcs successifs que vous aurez ainsi décrits formeront une ligne courbe qui est la génératrice de la surface de révolution limitant le liquide, dans les conditions du cas particulier considéré ([1]).

Cette méthode de résolution de l'équation capillaire des surfaces de révolution est restée inutilisée pendant quinze ou vingt ans, jusqu'au moment, où en 1874, je l'indiquai à M. John

Fig. 11.

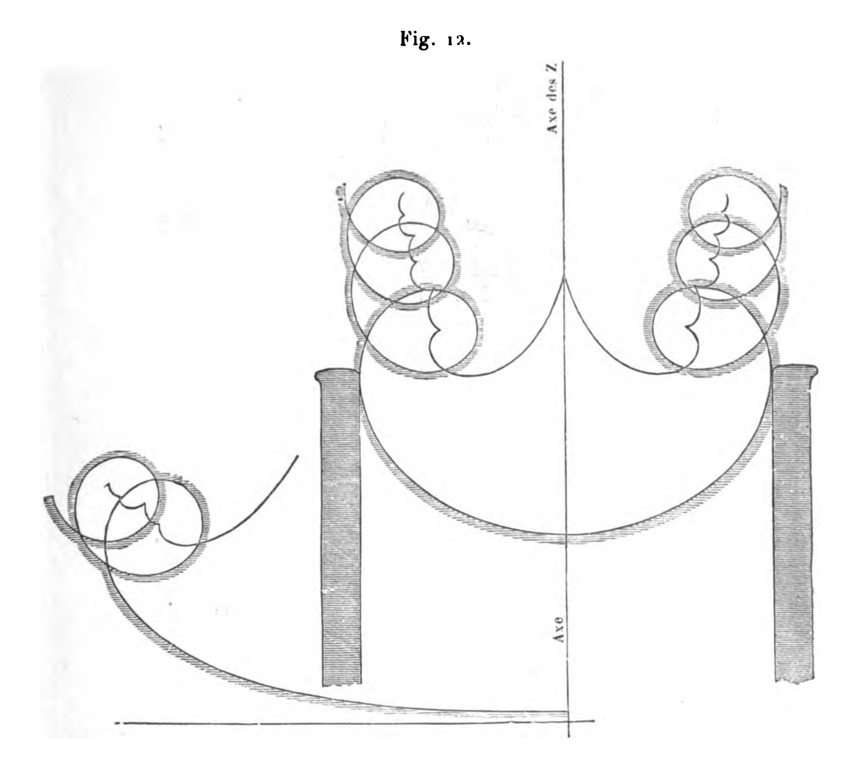


Perry (aujourd'hui professeur de Mécanique à *City and Guilds Institute*) qui étudiait alors la Philosophie naturelle au laboratoire de l'Université de Glasgow. Il traita le problème avec beaucoup de persévérance et d'habileté, et le résultat de ses travaux fut une série de dessins habilement exécutés, repré-

([1]) On obtient un peu plus de précision, d'après Sir W. Thomson, en prenant les points P, P′, P″, non pas comme extrémités des arcs décrits de O, O′, ... comme centres, mais comme milieux de ces arcs; on établit mieux ainsi la correspondance entre les différences de niveau et les rayons de courbure employés. M. B.

sentant une grande variété de cas de surfaces de révolution capillaires. Je n'ai pas encore pu préparer la publication de ces dessins, qui sont très instructifs et très précieux, mais les plus caractéristiques d'entre eux ont été reproduits à une plus grande échelle, et sont maintenant projetés sur l'écran sous

Fig. 12.



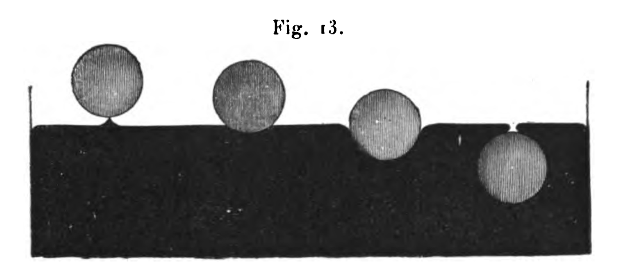
vos yeux ([1]). Trois de ces dessins, ceux que je montre du doigt en ce moment (*fig.* 10, 11 et 12) figurent rigoureusement les solutions théoriques, c'est-à-dire que les courbes

([1]) Les dessins dont il est question ont été publiés pour la première fois dans les *fig.* 10 à 24 du compte rendu que *Nature* a donné de cette conférence (22 et 29 juillet, et 19 août 1886). Ces figures sont des copies fidèles des dessins originaux de M. Perry, et je tiens à remercier M. Cooper, graveur de *Nature*, du grand soin et de la grande attention qu'il a apportés à son travail.

indiquées ici ne représentent pas les surfaces capillaires réelles; mais de telles extensions mathématiques du problème, quoique très intéressantes et très instructives, ne peuvent pas être traitées convenablement dans le temps dont je dispose.

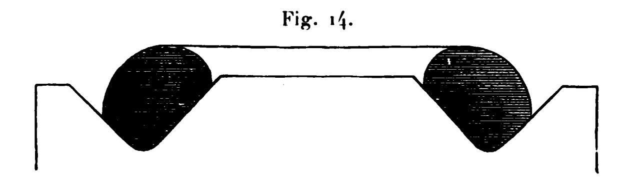
Ces autres dessins (*fig.* 13 à 28) montrent certaines por-

Fig. 13.



tions des courbes, choisies de manière à représenter la section des surfaces capillaires réelles. La *fig.* 13 montre une sphère solide en contact avec la surface du mercure dans quatre positions différentes; d'autre part, la *fig.* 14 donne la section de la forme que prend le mercure dans une rigole circulaire creusée en forme de V.

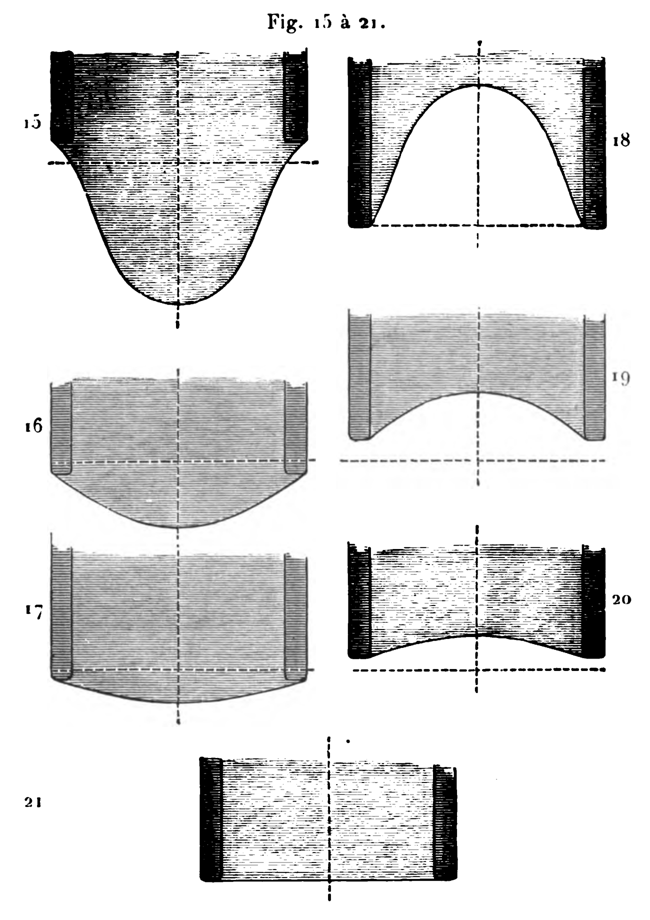
Fig. 14.



Les *fig.* 15 à 28 montrent des surfaces d'eau sous différentes conditions relativement à la capillarité; l'échelle des dessins pour chaque série de figures est indiquée par une ligne dont la longueur représente un centimètre; les lignes pointillées horizontales indiquent la position du niveau libre de l'eau. Les dessins sont suffisamment clairs pour qu'il ne soit pas besoin de les expliquer plus longuement ici, sauf à faire remarquer que *l'eau* est représentée par les portions les moins ombrées, et le *solide* par les plus sombres.

Nous avons supposé que nos masses d'eau solidifiées repre-

Fig. 15 à 21.



Eau dans des tubes de verre, dont on trouvera le diamètre intérieur au moyen de la *fig.* 22, qui représente la longueur de 1 centimètre. La ligne horizontale pointillée représente dans chaque figure la position du niveau libre de l'eau.

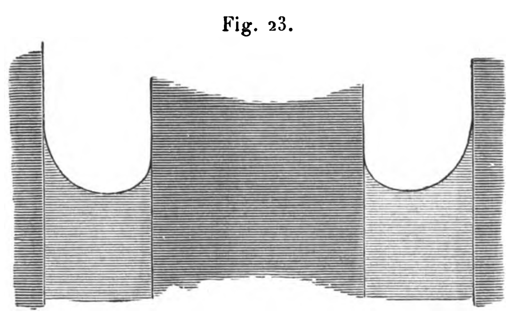
Fig. 22.

Longueur de 1 centimètre pour les *fig.* 15 à 21.

naient subitement l'état liquide, et imaginé qu'elles étaient

enfermées dans des membranes idéales contractiles; j'ai ici une disposition qui me permettra de vous montrer, à une plus grande échelle, une goutte pendante enfermée non dans une membrane *idéale*, mais dans une membrane *réelle* formée d'une mince feuille de caoutchouc. L'appareil que vous voyez ici suspendu au plafond est un fort anneau de métal, de $0^m,60$ de diamètre environ, dont l'ouverture est fermée par une feuille de caoutchouc serrée tout autour de lui, tendue uniformément dans toutes les directions et aussi fortement qu'on a pu le faire sans employer des appareils spéciaux pour la tendre et l'attacher ensuite à l'anneau.

Fig. 23.



Eau placée dans l'espace compris entre un cylindre solide et un cylindre creux ayant même axe.

J'y verse maintenant de l'eau, et nous voyons que le fond flexible prend très sensiblement la même forme que la goutte que vous voyiez pendre de mon doigt après que je l'avais plongé dans l'eau et retiré du vase (voir *fig.* 16, p. 25, ci-dessus).

Je continue à ajouter de l'eau; le fond se déforme graduellement et lentement, tout en conservant la forme générale d'une goutte semblable à celle qui est dessinée dans la *fig.* 15, jusqu'au moment où, une certaine quantité d'eau ayant été versée, il se produit un changement brusque. Ce changement soudain correspond à la chute d'une goutte d'eau réelle du bec d'un samovar, par exemple, quand le robinet est assez peu ouvert pour que les gouttes ne se forment que très lente-

ment. Mais la goutte, dans la bourse de caoutchouc, ne tombe

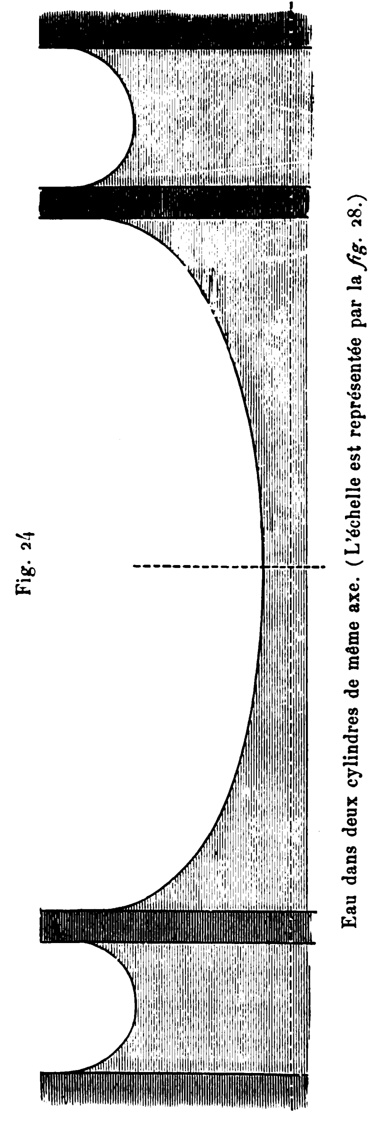


Fig. 24

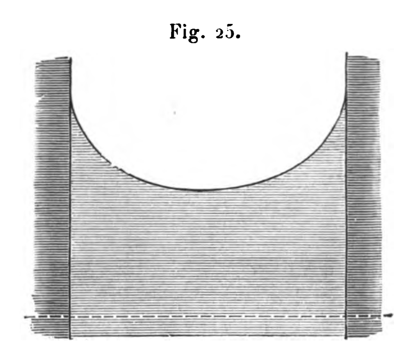
Eau dans deux cylindres de même axe. (L'échelle est représentée par la *fig.* 28.)

pas, parce que la tension de la feuille de caoutchouc augment

énormément quand elle est étirée. La tension de la membrane réelle à la surface de la goutte d'eau reste constante, aussi fortement que cette surface soit tirée; dans ces conditions, la goutte se détache dès qu'elle a atteint, grâce à l'eau qu'elle reçoit d'en haut, le volume maximum qui puisse rester suspendu à un tube de la dimension de celui qu'on emploie.

J'amorce maintenant ce siphon, de manière à retirer graduellement une partie de l'eau, et nous voyons que la goutte se réduit graduellement jusqu'à ce qu'un brusque changement

Fig. 25.



se produise de nouveau, et qu'elle prenne la forme déjà observée (*fig.* 16, p. 25), lorsque j'ai versé l'eau pour la première fois. J'arrête brusquement l'action du siphon; nous allons voir que cette grosse goutte a deux formes possibles d'équilibre stable, avec une forme instable intermédiaire. Voici une preuve expérimentale de ce que j'avance. La goutte possédant sa forme stable la plus aplatie, je la fais vibrer de manière à diminuer et à augmenter alternativement la longueur de son axe, et vous voyez que, quand les vibrations sont capables d'accroître la longueur jusqu'à une certaine limite, il y a un passage soudain à la forme stable la plus allongée; nous pouvons maintenant laisser la masse exécuter de petites oscillations autour de cette dernière forme. J'accrois l'amplitude de ces petites oscillations; lorsque, dans la période ascendante d'une de ces vibrations (d'amplitude croissante), la contraction de l'axe atteint la valeur limite dont

j'ai déjà parlé, il se fait de nouveau, vous le voyez, un brusque

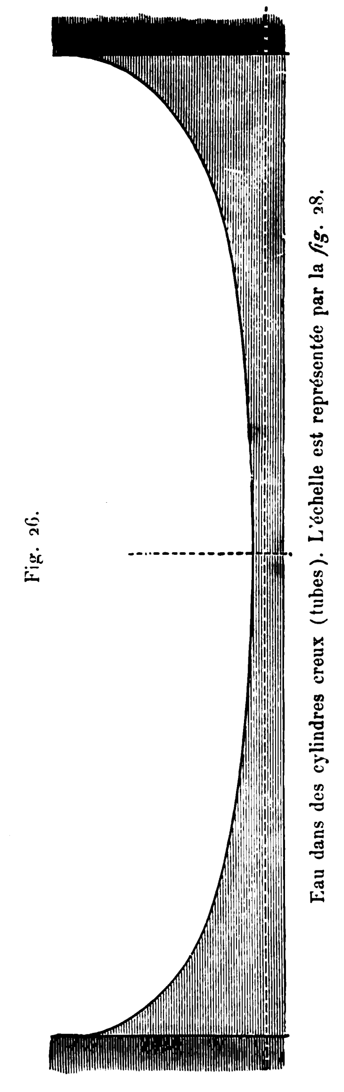


Fig. 26.

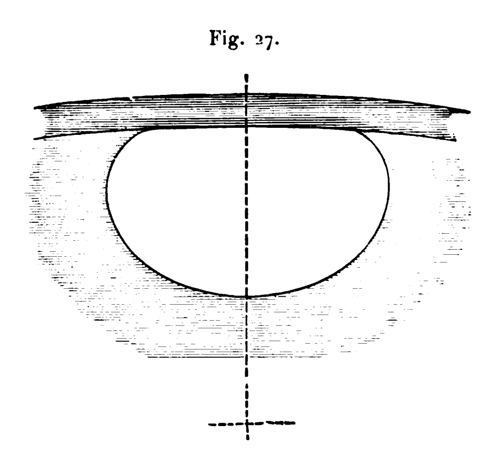
Eau dans des cylindres creux (tubes). L'échelle est représentée par la *fig.* 28.

changement que je provoque en soulevant doucement la goutte avec mes mains; la masse prend la forme stable la

plus aplatie, et vous la voyez de nouveau exécuter de petites oscillations autour de cette forme.

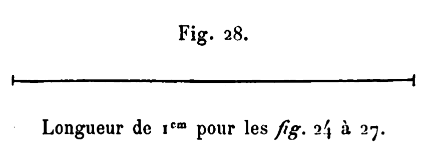
Ces deux positions d'équilibre stable et la position d'équi-

Fig. 27.



Section de la bulle d'air dans un tube de niveau rempli d'eau, et courbé de façon que son axe soit un arc de cercle de grand rayon; l'échelle est représentée *fig.* 28.

Fig. 28.



Longueur de 1cm pour les *fig.* 24 à 27.

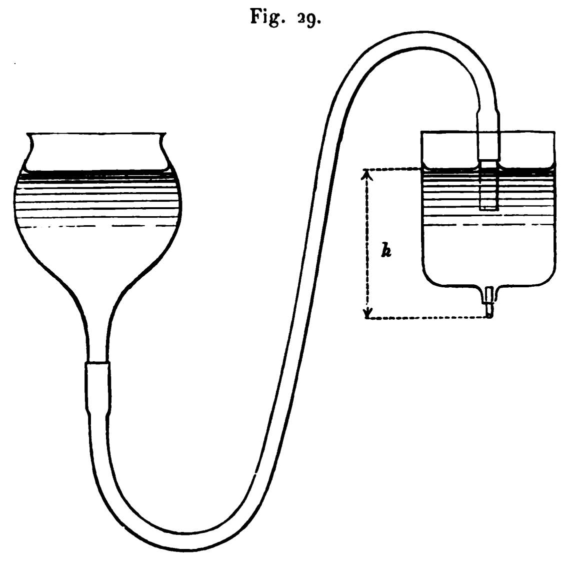
libre instable intermédiaire constituent une particularité curieuse du problème d'hydrostatique présenté par l'eau supportée par du caoutchouc, comme elle l'est dans cette expérience.

Voici une disposition simple (*fig.* 29 et 30) au moyen de laquelle, avec l'aide d'instruments d'optique convenables, tels qu'un cathétomètre et un microscope, nous pourrons exécuter sur de vraies gouttes d'eau ou d'un autre liquide les mesures nécessaires pour déterminer les valeurs des constantes capillaires.

Pour que la goutte suspendue au tube fût stable, il faudrait

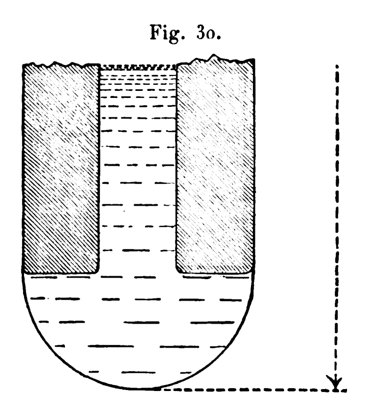
que son volume fût un peu moindre qu'une demi-sphère ; mais, pour plus de commodité, je la figure, comme dans le dessin

Fig. 29.



agrandi de l'extrémité du tube (*fig.* 30) exactement hémisphérique. Au moyen du siphon, on peut faire varier la diffé-

Fig. 30.



rence des niveaux, *h*, entre la surface libre de l'eau dans le vase auquel est fixé le tube, et le point le plus bas de la goutte

qui y est suspendue, ce qui permet de prendre des mesures correspondantes de h et du rayon de courbure r de la goutte à son point le plus bas. Cette mesure de la courbure de la goutte peut être faite facilement et avec une exactitude satisfaisante au moyen des méthodes microscopiques connues. La tension superficielle T du liquide peut être calculée à l'aide de la formule suivante quand on connaît le rayon r et la différence de niveau observée h :

$$\frac{2T}{r} = h;$$

par exemple, si le liquide considéré est de l'eau, ayant une tension superficielle de $0^{gr},075$ par centimètre, et si $r = 0^{cm},05$, h est égal à 3 centimètres.

La *fig.* 31, représentant une goutte d'encre au moment où elle se détache de la douille d'un entonnoir de verre, est dessinée d'après une photographie instantanée que m'a obligeamment remise M. Graham de Skipness, Argyllshire. Il a pris lui-même, sur une « plaque rapide Ilford », ce cliché d'une goutte d'encre sur le point de se détacher de la douille d'un entonnoir de verre.

On peut imaginer bien des expériences pour montrer les effets de la tension superficielle, lorsque deux liquides, dont les tensions superficielles sont très différentes, sont amenés en contact l'un avec l'autre. Ainsi nous pouvons placer à la surface d'une mince couche d'eau, mouillant uniformément la surface d'une plaque ou d'une auge de verre, une goutte d'alcool ou d'éther, et rendre ainsi plus faible la tension superficielle de la couche liquide dans la région recouverte par l'alcool ou l'éther. D'autre part, si nous avons une couche d'alcool fortement dilué avec de l'eau, nous pourrons nous arranger de façon à chasser une partie de l'alcool sur une certaine portion de la surface en y provoquant une évaporation rapide; nous accroîtrons ainsi la tension superficielle de la couche liquide dans cette région, grâce à la diminution de la proportion d'alcool qu'elle contient.

Dans cette auge peu profonde, dont le fond de verre poli repose sur du papier blanc afin que les phénomènes que je

vais vous montrer soient plus facilement visibles, il y a une mince couche d'eau colorée en bleu foncé par de l'aniline; je dépose maintenant sur la surface une faible quantité d'alcool au moyen de cette fine pipette; remarquez ce qui se passe quand l'alcool, dont la tension superficielle est seulement de $25^{mgr},5$ par centimètre, arrive au contact de l'eau, qui a une tension de 75^{mgr} par centimètre. Voyez comment l'eau se retire, formant, pour ainsi dire, tout autour de l'alcool,

Fig. 31.



un sillon circulaire entourant une cavité ou un petit cratère, qui s'élargit et se creuse peu à peu jusqu'à ce que la plaque de verre soit mise à nu au centre, et que le liquide s'élève autour, en une éminence circulaire. De même, si je trace un trait au travers de l'auge, au moyen d'un pinceau imbibé d'alcool, nous voyons l'eau se retirer de chaque côté de la partie de l'auge touchée par le pinceau. Si maintenant j'incline l'auge de verre, il est très intéressant de voir comment l'eau colorée, additionnée d'une petite quantité d'alcool, s'écoule suivant la pente, d'abord en gouttes isolées, qui se rejoignent

ensuite les unes les autres, et forment de minces filets continus.

Ces phénomènes et d'autres bien connus, parmi lesquels le phénomène très intéressant des « larmes du vin fort », ont été décrits et expliqués par mon frère, le professeur J. Thomson, dans un Mémoire *Sur certains mouvements curieux observables à la surface du vin et d'autres liqueurs alcooliques,* lu devant la section A de l'Association Britannique au Congrès de Glasgow, en 1855 ([1]).

J'ai reconnu qu'une solution contenant environ 25 pour 100 d'alcool montre rapidement et bien les « larmes », mais qu'on ne peut, en aucune façon, les produire si la proportion d'alcool est beaucoup plus petite ou beaucoup plus grande que 25 pour 100. Dans deux de ces flacons, la solution colorée contient respectivement 1 pour 100 et 90 pour 100 d'alcool, et vous voyez qu'il est impossible d'y produire les « larmes »; mais si je prends ce troisième flacon dans lequel la liqueur colorée contient 25 pour 100 d'alcool, et si je fais l'expérience avec lui, vous voyez, en ce moment même, que les « larmes » commencent à se former de suite. J'incline d'abord et fais tourner le flacon de manière à mouiller avec le liquide sa surface interne; puis, le laissant tout à fait en repos, j'entraîne hors du flacon, au moyen de ce tube de papier, le mélange d'air et de vapeur alcoolique, et permets à de l'air pur de prendre sa place. De cette manière, je provoque l'évaporation de l'alcool par toutes les surfaces liquides contenues dans le flacon; partout où le liquide est réduit à l'état d'une mince pellicule, il perd très promptement une grande partie de son alcool. Donc la tension superficielle de la mince membrane liquide qui tapisse la paroi interne du flacon prend une valeur qui dépasse de plus en plus celle de la tension superficielle de la masse de liquide qui occupe le fond, et partout où ces deux surfaces liquides ayant des tensions superficielles différentes se rencontrent, le phénomène des « larmes » se produit. Ici, quand j'active l'évaporation, vous voyez un anneau horizontal de liquide se former et grimper contre la

(1) *Voyez* ci-dessous, page 37, l'Appendice A à cette Conférence.

paroi du flacon : ensuite nous voyons le liquide, qui s'est ainsi élevé, se rassembler en gouttes qui descendent le long de la paroi, et donnent un aspect frangé à l'espace par lequel a passé l'anneau en s'élevant ([1]).

On peut encore observer ces phénomènes en se servant, au lieu d'alcool, de l'éther qui a une tension superficielle égale aux trois quarts environ de celle de l'alcool. En outre, l'éther permet d'observer un effet très curieux ([2]). Je plonge le pinceau dans l'éther, puis je le maintiens au voisinage de la surface de l'eau, mais sans la toucher. Je vois se former une cavité qui devient plus ou moins profonde suivant que le pinceau est plus ou moins près de la surface normale, et cette cavité suit le pinceau partout où je le fais aller.

Voici une expérience montrant l'effet de la chaleur sur la tension superficielle. Sur une partie de cette plaque de fer-blanc, je place une mince couche de résine. Je mets la plaque de fer-blanc au-dessus de ce cylindre de cuivre chaud, et nous voyons immédiatement la résine fluide se retirer de la portion de la plaque qui repose directement sur le bout du cylindre de cuivre chauffé, et laisser sur la surface un espace circulaire presque dégagé de résine, montrant combien la tension superficielle de la résine chaude est moindre que celle de la résine froide.

Note du 30 *janvier* 1886. — Les équations (8) et (9), à la page 59 de l'article de Clerk Maxwell, *Capillary Attraction*,

---

([1]) Le paragraphe suivant, emprunté à la *Chaleur* de Clerk Maxwell, éd. 1871, p. 273, contient d'intéressants renseignements sur cette partie de notre sujet :

« Ce phénomène, connu sous le nom de *larmes de vin fort*, a été pour la première fois expliqué d'après ces principes par le professeur James Thomson. Il est probable qu'il y est fait allusion dans les Proverbes, XXIII, 31 ([a]), comme indication de la force du vin. Le mouvement cesse dans un flacon bouché aussitôt qu'il s'est formé assez de vapeur d'alcool dans le flacon pour qu'il y ait équilibre avec l'alcool liquide contenu dans le vin. »

([2]) *Voyez* l'article de Clerk Maxwell (p. 65), *Capillary Attraction* (*Encyclopædia Britannica*, 9e édition).

([a]) Voici le texte de ce passage : « Ne regarde pas le vin qui paraît d'un beau rouge, qui fait des perles dans la coupe et qui coule aisément. »



dans la 9[e] édition de l'*Encyclopædia Britannica,* ne contiennent pas de termes dépendant de l'action mutuelle entre les deux liquides, et l'expression finale (10) ainsi que le dernier paragraphe de la page, imprimé en petits caractères, sont complètement faussés par cette omission. Voici le paragraphe qui suit immédiatement l'équation (10) :

« Si cette quantité est positive, la surface de contact tendra à se contracter, et les liquides resteront distincts. Si elle était négative, le déplacement des liquides, qui tend à agrandir la surface de contact, serait favorisé par les forces moléculaires, de telle sorte que les liquides, s'ils ne restaient pas séparés en vertu de la gravité, se mélangeraient complètement. Toutefois, on n'a pas découvert d'exemple d'un phénomène de cette nature, car les liquides qui se mélangent d'eux-mêmes se mélangent en suivant la marche de la diffusion, qui est un mouvement moléculaire, et non grâce à une déformation et à un plissement spontanés de la surface de séparation, ce qui serait le cas si T était négative. »

Il me semble que cette idée n'est pas juste, mais qu'au contraire il y a un pareil « plissement » *tout au commencement* de la diffusion. Ce que j'ai indiqué ci-dessus, dans le corps de cette Conférence, au sujet de la diffusion et de ses relations avec la tension de la surface de séparation, me paraît être la vraie manière d'envisager la question.

On peut aussi remarquer que Clerk Maxwell, dans le paragraphe imprimé en gros caractères (p. 59) qui précède l'équation (1), et dans son application du terme *énergie potentielle* à E dans le paragraphe en petits caractères, désignait par *énergie* ce qui est en réalité une perte d'énergie ou de l'énergie négative, et la même inadvertance rend très obscur le paragraphe en petits caractères de la page 60. L'énoncé curieux et intéressant du haut de la seconde colonne de la page 63, relatif à une goutte de sulfure de carbone en contact avec une goutte d'eau dans un tube capillaire, réaliserait un mouvement perpétuel s'il était vrai pour un tube qui n'aurait pas d'abord été mouillé avec de l'eau sur une partie de son

canal : « ... Si une goutte d'eau et une goutte de sulfure de carbone sont placées en contact dans un tube capillaire horizontal, le sulfure de carbone chassera l'eau le long du tube. »

Note additionnelle du 5 juin 1886. — J'ai essayé avec soin l'expérience signalée dans la phrase précédente, et n'ai pas constaté le mouvement indiqué.

APPENDICE A.

SUR CERTAINS MOUVEMENTS CURIEUX OBSERVABLES A LA SURFACE DU VIN ET D'AUTRES LIQUEURS ALCOOLIQUES.

[*Mémoire du professeur James Thomson, lu devant la section A de l'Association Britannique au Congrès de Glasgow de* 1855 (*Brit. Assoc. Report for* 1855, IIe Partie, p. 16, 17)].

Les phénomènes d'attraction capillaire dans les liquides s'expliquent, suivant la théorie du Dr Young, généralement adoptée, par l'existence de forces équivalant à une tension de la surface du liquide, constante dans toutes les directions, et indépendante de la forme de la surface. Cette force de tension n'est pas la même pour les différents liquides. Ainsi on trouve qu'elle est plus faible pour l'alcool que pour l'eau. Ce fait donne l'explication de mouvements très curieux qu'on peut observer, dans des circonstances variées, à la surface des liqueurs alcooliques. En premier lieu, si au milieu de la surface d'un verre d'eau on introduit avec précaution une faible quantité d'alcool ou d'une liqueur spiritueuse forte, la surface de l'eau semble s'éloigner vivement de la région où a été déposé l'alcool. On rend ce mouvement plus apparent en saupoudrant la surface d'une fine poussière. D'autre part, si les parois d'un vase sont mouillées avec de l'eau au-dessus du niveau général de la surface de l'eau, et si l'alcool est déposé en quantité suffisante au milieu du vase, ou si on le fait arriver près de la paroi, on voit le liquide monter le long du verre, puis s'accumuler en certains endroits à tel point que son poids l'emporte et qu'il finit par retomber. L'auteur

explique de la manière suivante ces deux phases des phénomènes : les portions les plus aqueuses de la surface entière, ayant une tension supérieure à celle des portions les plus alcoolisées, tirent fortement les dernières, les tirent même assez quelquefois pour former un anneau liquide qui s'élève tout autour de l'intérieur du vase, et qui est plus épais que celui qui mouillait ce vase. Les différentes parties de cet anneau ou de cette ligne tendent alors à couler ensemble vers les portions du liquide qui s'enrichissent le plus en eau; par suite, il n'y a pas d'équilibre stable; car les parties auxquelles viennent se joindre les diverses portions du liquide deviennent bientôt trop pesantes pour rester soutenues et elles retombent. Le même mode d'explication, si on le pousse un peu plus loin, donne la raison des curieux mouvements qu'on observe ordinairement dans la mince couche de vin qui adhère à l'intérieur d'un verre à boire, quand, le verre ayant été partiellement rempli de vin, on l'a agité de manière à mouiller l'intérieur au-dessus du niveau général de la surface du liquide; en effet, pour expliquer ces mouvements, il suffit de considérer encore que la couche mince qui adhère à l'intérieur du verre devient très rapidement plus riche en eau que le reste du liquide, l'alcool qu'elle contient s'évaporant beaucoup plus rapidement que l'eau. A ce sujet, l'auteur a montré à la section une expérience très probante. Il a montré que, dans un flacon partiellement rempli de vin, le mouvement indiqué ne se produit pas, tant que le flacon reste bouché. Pourtant, si on enlève le bouchon et si avec un tube on puise l'air saturé de la vapeur émise par le vin, de manière à le remplacer par de l'air pur capable de déterminer l'évaporation, on voit de suite monter à l'intérieur du flacon une couche liquide en forme d'anneau horizontal, accompagnée de filets descendants, d'apparence visqueuse, et qui pendent de cet anneau comme une frange d'un rideau. L'auteur a donné un autre exemple frappant, en versant de l'eau dans une auge plate en argent, préalablement débarrassée avec le plus grand soin de tout ce qui aurait pu empêcher l'eau de mouiller complètement la surface. La couche d'eau avait une épaisseur de $2^{mm},5$ environ. Quand on eut déposé un peu d'alcool au milieu de l'auge, l'eau s'écarta immédiatement du milieu, y formant une profonde excavation qui laissa le fond dépourvu de liquide, à l'exception d'une pellicule extrêmement mince. Ces expériences et d'autres, qui ont été faites en saupoudrant la surface de l'eau de fine poudre de lycopode, et en introduisant doucement l'alcool au milieu de l'eau avec un tube fin, sont très simples et peuvent être faci-

lement répétées. L'auteur s'est déclaré incapable d'expliquer complètement de curieux mouvements du liquide qu'il a montrés sur la surface au moyen de la poudre de lycopode. Il a fait allusion aux très intéressants phénomènes observés précédemment par M. Varley, et décrits dans le 50e Volume des *Transactions de la Société des Arts*, et a exprimé l'opinion qu'on montrera que beaucoup de ces phénomènes, sinon tous, peuvent être expliqués d'après les principes qu'il a indiqués.

APPENDICE B.

NOTE SUR LA GRAVITATION ET LA COHÉSION.

(*Mémoire lu devant la Société Royale d'Édimbourg, et publié dans les Proc. R. S. E.*, 21 avril 1862.)

L'idée que l'on se fait communément, d'après la théorie de Boscovich, de la cohésion des solides et des liquides, est qu'elle résulte d'une force d'attraction s'exerçant entre les particules de la matière, force qui croît beaucoup plus rapidement que l'inverse du carré de la distance, lorsque la distance tombe au-dessous d'une limite très faible. Cette conception pourrait, en effet, sembler inévitable, à moins de rejeter complètement l'idée d' « attraction »; en effet, la loi d'attraction aux distances sensibles, la loi de Newton, démontrée par son auteur pour des distances qui ne sont pas incomparablement plus faibles que les dimensions de la Terre et vérifiée par Maskelyne et Cavendish d'une manière qui ne permet à aucun physicien de douter raisonnablement de son application à l'action mutuelle entre des particules distantes les unes des autres de quelques centaines de mètres ou de quelques centimètres, semble ne donner que des forces très petites, à peine appréciables, entre des corps de la masse de ceux sur lesquels portent nos expériences de laboratoire, même si on les place aussi près que possible les uns des autres, c'est-à-dire au contact; et elle ne paraît pas donner un accroissement considérable de l'attraction lorsqu'on augmente la surface de contact, soit en pressant les corps l'un contre l'autre, soit

en les façonnant de manière qu'ils s'appliquent l'un sur l'autre dans toute l'étendue d'une large surface.

Mais si nous tenons compte de la distribution irrégulière de la densité, base essentielle de toute théorie moléculaire de la matière, nous voyons sans peine qu'elle suffit à elle seule à grandir la force d'attraction entre deux corps placés très près l'un de l'autre, ou entre deux portions d'un même corps, et que dès lors la cohésion peut être expliquée sans imaginer d'autres forces que celle de la gravitation ou d'autres lois que celle de Newton. Pour le prouver, plaçons deux cubes homogènes de façon qu'une face de l'un soit en contact parfait avec une face de l'autre; condensons le tiers de la matière de chaque cube dans un très grand nombre i de barres carrées perpendiculaires à la face commune et éloignons pour le moment les deux autres tiers. La masse de chaque barre sera la fraction $\frac{1}{3i}$ de la masse totale donnée primitivement à chaque cube.

Supposons en outre que les deux groupes de barres soient placés de telle façon que chaque barre d'un des groupes ait une de ses extrémités en contact parfait avec l'extrémité d'une barre de l'autre groupe. L'attraction entre deux barres ayant ainsi une extrémité commune peut être augmentée sans limite, quelque faibles que soient leurs masses, si l'on diminue l'aire de leur section, et si on laisse leurs masses constantes. Mais l'attraction totale entre les deux groupes est égale à i fois l'attraction entre chacun des couples de barres ayant une extrémité commune, et peut dès lors prendre une valeur aussi grande qu'on le voudra, simplement par la condensation de chacune de ces barres dans sa section transversale, leur nombre et la masse de chacune d'elles restant les mêmes.

Nous pouvons maintenant supposer qu'un autre tiers de la masse totale soit condensé dans des barres parallèles à une autre arête du cube, et le dernier tiers dans des barres parallèles à la troisième. Si, alors, chacun de ces cubes est mis par une de ses faces en contact avec une des faces de l'autre et si on leur permet de prendre la position lative vers laquelle ils tendent évidemment, celle dans laquelle les barres perpendiculaires aux faces communes des deux cubes viennent se mettre bout à bout, il naît entre eux, en vertu de la seule gravitation, une force attractive qui peut avoir une valeur aussi grande que l'on voudra, et d'autant plus grande que le rapport de tout l'espace

libre dans l'intérieur de chaque cube à l'espace occupé par la matière des barres est lui-même plus grand.

L'exemple a été choisi uniquement en vue d'avoir quelque chose de simple et de déterminé; mais il est clair qu'une disposition quelconque en fibres entrelacées, quelle que soit sa complexité, conduira à la même conclusion générale, pourvu que le rapport de l'espace libre à l'espace occupé soit assez grand. En outre, il est clair qu'on obtiendra le même résultat par une hétérogénéité de structure quelconque, mais suffisamment accusée, pourvu seulement qu'une quantité appréciable de la masse entière soit tellement condensée dans un espace continu pris à l'intérieur, que l'on puisse de chaque point de cet espace comme centre, décrire une surface sphérique qui contienne une quantité de matière beaucoup plus grande que la fraction de la masse totale du corps qui correspondrait à son volume. En dehors de cette condition, la théorie suggérée ici ne contrarie aucune des hypothèses moléculaires proposées jusqu'à présent, structure continue ou atomique, atomes finis, ou centres de force, hypothèse statique ou dynamique.

La science physique abonde en preuves qu'il y a une hétérogénéité élémentaire très accusée dans la constitution de la matière. Tout ce qu'il y a d'acceptable dans la théorie chimique malheureusement appelée « atomique » semble être l'hypothèse d'une telle hétérogénéité pour l'explication de la combinaison des substances. Cette hétérogénéité ne suffit pas, il est vrai, à expliquer la loi des combinaisons en proportions définies; mais l'hypothèse de particules finies de matière absolument solides (atomes insécables) ne l'explique pas non plus; et, quelque supposition que l'on fasse sur le genre de structure d'un composé chimique, on doit, pour atteindre le but auquel quelques écrivains semblent se croire conduits par leur « théorie atomique », ajouter une loi dynamique d'affinité entre les substances, suivant les proportions de ces substances qui se trouvent en repos ou en mouvement l'une à côté de l'autre.

Il est satisfaisant de reconnaître qu'en ce qui concerne la cohésion, il n'y a pas besoin d'admettre d'autre force que la force de gravitation (1).

---

(1) Il reste toujours impossible d'expliquer l'existence de corps solides *limités*, encore compressibles, de cristaux à forme définie par l'action de forces attractives seules. L'existence d'une surface limite en équilibre exige que quelque chose empêche l'action des forces attractives de concentrer indéfiniment la matière.



APPENDICE C.

SUR L'ÉQUILIBRE D'UNE VAPEUR EN PRÉSENCE D'UNE SURFACE LIQUIDE COURBE.

(*Mémoire lu devant la Société Royale d'Édimbourg, et publié dans les Proc. R. S. E.*, le 7 février 1870, t. VII, p. 63-68.)

Dans un vase contenant seulement un liquide et sa vapeur, tous deux à la même température, le liquide dont la surface libre est élevée ou déprimée dans des tubes capillaires et au voisinage de la paroi solide prend un état d'équilibre stable régi par la même loi de relation entre la courbure et la pression, que si le vase était ouvert dans l'air. La stabilité de cet équilibre implique un équilibre physique entre le liquide et la vapeur qui est en contact avec lui par toute sa surface. Mais les pressions de la vapeur à différents niveaux diffèrent entre elles selon la loi de l'Hydrostatique. Donc la pression de la vapeur saturante en contact avec un liquide varie avec la courbure de la surface limite; elle est plus faible quand le liquide est concave et plus forte quand il est convexe. Et, quand diverses portions du liquide sont placées dans des vases séparés, tous enfermés dans une même enceinte, leurs sur-

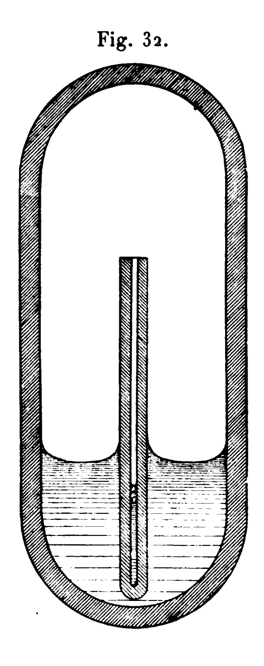
---

Ce quelque chose, on peut le demander aux mouvements calorifiques, ou à des actions répulsives que ces mouvements feraient naître par réaction de l'éther, ou à des actions répulsives directes. Il ne semble pas que des mouvements oscillants puissent maintenir les corps à distance malgré une attraction centrale, à moins d'être comme pour les corps célestes, des mouvements de circulation *autour* du corps central; et la forme définie des cristaux, par exemple, ne paraît pas permettre de circulation des molécules les unes autour des autres, mais seulement des oscillations qui ne mélangent pas les domaines de deux molécules; moins encore dans la disposition feutrée, fibreuse, suggérée ici par Thomson, que dans la disposition ponctuelle de Boscovich.

Quant à des actions secondaires résultant de ce que les molécules oscillantes sont plongées dans un milieu qui est lui-même en mouvement vibratoire, peut-être peuvent-elles suffire, sans qu'il soit besoin d'imaginer des actions directes, du moins pour la partie physique des phénomènes; pour la partie chimique, cela me paraît beaucoup plus douteux. M. B.

faces libres ne peuvent se fixer dans d'autres positions relatives que celles qu'elles occuperaient, s'il y avait des communications hydrostatiques de pression entre les portions du liquide placées dans les divers vases. Il doit y avoir évaporation aux surfaces qui sont trop haut, et condensation de liquide à celles qui sont trop bas, et cela jusqu'à ce que l'équilibre hydrostatique soit atteint, tout comme si les pressions pouvaient se transmettre librement d'un vase à l'autre. Ainsi, par exemple,

Fig. 32.



si l'on a deux vases d'eau largement ouverts, dont l'un soit à un niveau beaucoup plus élevé que l'autre, et si la température ambiante reste rigoureusement constante, le liquide dans le vase le plus élevé s'évaporera graduellement jusqu'à ce qu'il soit allé se condenser tout entier dans le vase le moins élevé. Ou si, comme cela est indiqué dans le dessin ci-joint (*fig.* 32), un tube capillaire, fermé à sa partie inférieure et contenant une petite quantité de liquide, est placé dans le voisinage d'une masse du même liquide présentant une large surface libre, la vapeur se condensera graduellement dans le tube capillaire jusqu'à ce que le niveau du liquide y soit le même que si la partie inférieure

du tube était en communication hydrostatique avec la grande masse de liquide. Qu'il y ait ou non de l'air au-dessus de la surface libre du liquide dans les différents vases, la condition de l'équilibre final est la même; mais la marche de l'évaporation et de la condensation qui conduisent à l'équilibre sera beaucoup ralentie par la présence de l'air. Les expériences de Graham et la théorie cinétique de Clausius et de Maxwell nous fournissent à peine, jusqu'à présent, des données suffisantes pour estimer la rapidité avec laquelle la vapeur provenant de l'un des liquides se diffusera à travers l'air et atteindra la surface d'un autre liquide à un niveau inférieur. Avec de l'air à une pression voisine de la pression atmosphérique ordinaire et dont la résistance retarderait le phénomène, celui-ci serait probablement trop lent pour donner des résultats nets, à moins de poursuivre les expériences pendant très longtemps. Mais si l'on enlève l'air aussi complètement qu'on peut le faire par les méthodes pratiques connues, il est probable que la marche du phénomène sera très rapide : il serait, à la vérité, instantané, n'était le refroidissement dû à l'évaporation dans un des vases, et l'échauffement dû à la condensation dans l'autre. Donc pratiquement, la rapidité de l'établissement de l'équilibre hydrostatique par l'intermédiaire de la vapeur, entre des liquides séparés, dépend de la rapidité des échanges de chaleur par les différentes surfaces, à travers les solides et les liquides intermédiaires. Sans avoir fait ni expériences, ni calculs sur la rapidité des échanges de chaleur dans ces conditions, je suis convaincu que l'eau monterait visiblement dans un temps très court dans le tube capillaire indiqué dans le dessin (*fig.* 32) et que, pourvu qu'on prît soin de maintenir l'égalité de température sur toute la surface du vase hermétiquement scellé, le liquide contenu dans le tube capillaire aurait bientôt pris à très peu près le même niveau que si son extrémité inférieure était ouverte : le niveau baisserait, si au début le tube était trop rempli, et s'élèverait, si au début (comme cela est indiqué dans le dessin), il n'y avait pas assez de liquide pour remplir la condition d'équilibre.

Les formules suivantes donnent précisément les relations entre les courbures, les différences de niveau et les différences de pression, dont nous avons parlé.

Soit ρ la densité du liquide, et σ celle de la vapeur; soit T la tension superficielle par unité de longueur, évaluée en prenant comme unité de force le poids de l'unité de masse. Désignons par h la hauteur d'un point quelconque P de la surface libre au-dessus d'un certain plan de

référence que j'appellerai, pour abréger, le plan niveau de la surface libre. Ce sera sensiblement le niveau réel de la surface libre dans les régions, s'il y en a, où la distance d'un point quelconque au bord (ou à la ligne limite à laquelle finit le liquide et commence le solide) n'est pas inférieure à quelques centimètres. Enfin, soient r et r' les rayons de courbure principaux de la surface en P. D'après la loi bien connue de Laplace, nous avons comme équation d'équilibre

$$(\rho - \sigma)h = \mathrm{T}\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right). \tag{1}$$

Dans l'espace occupé par la vapeur, la pression au plus élevé des deux points dont la différence de niveau est h est plus faible qu'à l'autre, d'une quantité égale à σh. Il y a, de plus, équilibre stable entre la vapeur et le liquide en tous les points de la surface libre. Donc, la pression de la vapeur en équilibre est moindre sur une surface liquide concave que sur une surface plane, et moindre sur une surface plane que sur une surface convexe, la différence étant $\frac{\mathrm{T}\sigma}{\rho - \sigma}$ quand la différence des courbures est égale à l'unité. C'est-à-dire, que si ϖ désigne la pression de la vapeur en équilibre sur une surface liquide plane, et p la pression de la vapeur du même liquide à la même température, et en contact avec la vapeur par une surface courbe, nous avons

$$p = \varpi - \frac{\mathrm{T}\sigma}{\rho - \sigma}\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right), \tag{2}$$

$\frac{1}{r}$ et $\frac{1}{r'}$ étant les courbures dans deux sections normales rectangulaires quelconques de la surface qui sépare le liquide de la vapeur, et ces courbures étant comptées positivement quand la surface est concave vers la vapeur.

Rigoureusement, la valeur de σ qu'il faudrait employer dans ces équations (1) et (2) devrait être la densité moyenne d'une colonne verticale de vapeur de hauteur h, ayant sa base dans le plan de référence. Mais dans tous les cas où l'on peut pratiquement appliquer ces formules, d'après nos connaissances actuelles sur les propriétés de la matière, la variation de densité dans cette colonne est extrêmement faible et peut être négligée. Si donc H représente la hauteur au-dessus du plan de référence, de la colonne d'un fluide idéal homogène et de densité égale à celle de la vapeur au niveau de ce plan, qui produirait en vertu de

son poids la pression réelle ϖ, nous avons

$$\sigma = \frac{\varpi}{\Pi},$$

d'où, d'après (1) et (2),

$$(3) \qquad p = \varpi\left(1 - \frac{h}{\Pi}\right).$$

Pour la vapeur d'eau aux températures ordinaires de l'atmosphère, Π est environ égal à 1300000 centimètres. Donc, dans un tube capillaire contenant de l'eau jusqu'à une hauteur de 13 mètres au-dessus du plan niveau, la surface courbe de l'eau est en équilibre avec la vapeur qui la surmonte, quand la pression de la vapeur est inférieure d'environ $\frac{1}{1000}$ de sa propre valeur, à la pression de la vapeur en équilibre au contact d'une surface plane d'eau à la même température.

Pour l'eau, la valeur de T aux températures ordinaires est environ de $0^{gr},08$ par centimètre; et ρ, étant la masse du centimètre cube, est exprimé, en grammes (¹), par l'unité. La valeur de σ pour la vapeur d'eau à une des températures ordinaires de l'atmosphère, est si faible, qu'elle peut être complètement négligée dans l'équation (1). Dans un tube capillaire parfaitement mouillé par l'eau, la surface libre est sensiblement hémisphérique, et par suite r et r' sont tous deux égaux au rayon de la surface interne de la couche liquide dont le tube est revêtu au-dessus de la surface libre; nous avons donc

$$h = 0,08 \times \frac{2}{r}.$$

D'après cela, si $h = 1300$ centimètres, $r = 0^{cm},00012$. Il est hors de doute que la théorie de Laplace est applicable sans modifications sérieuses, même dans un cas où la courbure est aussi grande (ou le rayon de courbure aussi faible) que dans celui-ci. Mais, dans l'état actuel de nos connaissances, nous n'avons pas le droit d'aller beaucoup au delà. Les forces moléculaires que la théorie de Laplace suppose être « insensibles aux distances sensibles » ne sont certainement que peu sensibles (si même elles le sont) à des distances égales ou supérieures aux longueurs d'onde de la lumière ordinaire. Cela est prouvé directement par les observations les plus superficielles sur les bulles de savon. Mais les apparences présentées par la tache noire qui termine brusquement la série des couleurs, aux endroits où la bulle est la plus mince avant la rupture, mon-

(¹) Il s'agit évidemment ici du gramme-masse. P. L.

trent d'une manière tout à fait certaine que l'action de ces forces devient sensible à des distances qui ne sont pas beaucoup plus faibles qu'une demi-longueur d'onde, ou $\frac{1}{40000}$ de centimètre. Il y a à la vérité, des preuves nombreuses et variées de ce fait, que dans les solides et les liquides ordinaires, non seulement les distances auxquelles sont sensibles les actions intermoléculaires, mais les dimensions linéaires des molécules elles-mêmes et la moyenne distance d'un centre au centre le plus voisin ([1]), ne sont que très médiocrement faibles comparativement aux longueurs d'onde de la lumière. On peut déduire de la théorie de Clausius sur l'espace moyen parcouru sans choc par les molécules des gaz, et de la théorie et des expériences de Maxwell sur la viscosité des gaz, une évaluation approchée des dimensions des molécules. Ayant une parfaite confiance dans l'exactitude matérielle des vues que nous ont ouvertes ces magnifiques recherches, je crois à peine possible d'admettre que le nombre des molécules dans un centimètre cube d'acide carbonique liquide ou d'eau atteigne 10^{27}. D'après cela, la distance moyenne d'un centre au centre le plus voisin dans les liquides dépasse un milliardième de centimètre!

Nous ne pouvons pas, dès lors, admettre que les formules données ci-dessus puissent être appliquées à exprimer la loi d'équilibre relative à l'humidité retenue par les substances végétales telles que la toile de coton, ou la farine d'avoine, ou les biscuits de farine de froment, à des températures très supérieures au point de rosée de l'atmosphère ambiante. Mais, quoique l'énergie de l'attraction de quelques-unes de ces substances pour la vapeur d'eau soit telle qu'elle peut quelquefois prétendre à être traitée par les chimistes comme due à une « affinité chimique » et donnant naissance à une « combinaison chimique » (lorsque la farine de blé, par exemple, préalablement desséchée à haute température, est employée, comme dans l'expérience originale de Sir J. Leslie, à produire la congélation de l'eau sous le récipient de la machine pneumatique), je crois que l'absorption de la vapeur par les tissus fibreux et cellulaires organiques est une propriété de la matière qui se rattache à l'absorption, ci-dessus démontrée, de la vapeur dans un tube capillaire.

([1]) Par « distance moyenne d'un centre au centre le plus voisin », j'entends l'arête du cube dans un réseau cubique d'un nombre de points égal au nombre réel des molécules contenues dans un espace quelconque.

APPENDICE D.

SUR LA MESURE DE LA QUANTITÉ D'HUILE NÉCESSAIRE POUR ARRÊTER LES MOUVEMENTS DU CAMPHRE SUR L'EAU.

(*Mémoire de lord Rayleigh, secrétaire de la Société Royale, lu devant la Société Royale,* le 27 mars 1890, *et reproduit ici avec son autorisation.*)

Le mouvement que prennent les petites parcelles de camphre à la surface de l'eau, phénomène qui a intrigué plusieurs générations de chercheurs, a été expliqué d'une manière satisfaisante par Van der Mensbrugghe (1), par la diminution de la tension superficielle de l'eau imprégnée de ce corps. Afin que les rotations puissent être vives, il est indispensable, comme l'a bien montré M. Tomlinson, d'observer la plus rigoureuse propreté. C'est une bonne précaution que de soumettre la surface interne du vase à un traitement préliminaire par l'acide sulfurique concentré. Le contact du doigt suffit d'ordinaire pour arrêter le mouvement, en communiquant à la surface de l'eau une couche de graisse. Quand la tension superficielle est ainsi abaissée, les variations dues aux différents degrés de dissolution du camphre ne sont plus suffisantes pour produire l'effet.

Il est évident, tout d'abord, que la quantité de graisse nécessaire est excessivement faible, si faible que, dans les conditions ordinaires des expériences, elle semblerait devoir échapper à nos méthodes de mesure. Cependant, à cause du grand intérêt qui s'attache à la détermination des grandeurs des molécules, le sujet paraît bien digne de provoquer des recherches; et j'ai trouvé qu'en augmentant suffisamment la surface de l'eau, les quantités de graisse nécessaires peuvent facilement être rendues assez grandes pour être mesurées par une balance sensible.

Dans les expériences actuelles, le seul corps gras essayé est l'huile d'olive. Il est désirable que la matière qui doit être étalée en couche aussi mince, soit insoluble, fixe, et ne s'oxyde pas rapidement, nécessités qui limitent beaucoup le choix.

(1) *Mémoires couronnés* (in-4°) de l'Académie de Belgique, t. XXXIV; 1869.

Passant sur quelques essais préliminaires, je vais décrire le procédé par lequel fut déterminée l'épaisseur d'huile nécessaire pour notre objet. L'eau formait une couche de faible épaisseur dans un *sponge-bath* (¹) de grandes dimensions où elle était amenée par un tube de caoutchouc en communication avec le trop-plein. Le diamètre de la surface circulaire ainsi obtenue était de 84 centimètres. Un fil de platine de faible longueur et de forme convenable supportait l'huile. Après chaque opération, on le nettoyait en le chauffant au rouge, et on le portait dans la balance. On lui communiquait alors une faible quantité d'huile, qu'on déterminait par la différence des lectures. On observait deux fois le mouvement du fléau dans chaque état du fil, et les poids qu'on en déduisait pour l'huile ont habituellement paru exacts à $\frac{1}{20}$ de milligramme au moins. Tout étant prêt, on dépose les particules de camphre à la surface de l'eau, en deux ou trois endroits très éloignés les uns des autres; elles prennent de suite un énergique mouvement. A ce moment, on abaisse avec précaution l'extrémité huilée du fil, de manière qu'elle vienne toucher l'eau. La couche d'huile avance rapidement sur la surface, poussant devant elle toutes les poussières ou tous les fragments de camphre qu'elle peut rencontrer. La surface est alors mise en contact avec les parties du fil sur lesquelles il peut y avoir de l'huile, de façon à assurer la complète élimination de celle-ci. Dans deux ou trois cas, on vérifia par un essai que la quantité d'huile qui restait était insuffisante pour arrêter les mouvements du camphre sur une surface de quelques centimètres carrés seulement.

Le meilleur moyen d'expliquer la manière dont les résultats ont été obtenus est de donner les détails du calcul pour une seule expérience, par exemple, la seconde du 17 décembre. Dans cette expérience, $0^{mgr},81$ d'huile à peu près ont suffi pour arrêter les mouvements. Le volume de l'huile en centimètres cubes est obtenu en divisant 0,00081 par le poids spécifique ou 0,9. La surface sur laquelle ce volume d'huile est étalé, est

$$\frac{1}{4}\pi \times 84^2 \text{ centimètres carrés,}$$

de sorte que l'épaisseur de la couche d'huile, calculée comme si la den-

(¹) Nous ne connaissons pas de nom français à l'objet très usité dont il est ici question. C'est un grand bassin plat, en zinc, souvent appelé *tub*, bien que *tub* en anglais signifie proprement un baquet en bois, formé de douves et de cercles.

P. L.

sité était la même que dans des conditions plus normales d'agrégation, est

$$\frac{0{,}00081}{0{,}9 \times \frac{1}{4}\pi \times 84^2} = \frac{1{,}63}{10^7} \text{ centimètres,}$$

ou, 1,63 micromillimètres. D'autres résultats obtenus, comme on le verra, à des intervalles de temps considérables, sont rassemblés dans le Tableau. Pour faciliter la comparaison, ils sont rangés non par ordre de date, mais par ordre d'épaisseur de la couche.

Un échantillon d'huile, un peu décoloré par exposition à l'air.

DATE.	POIDS de l'huile.	ÉPAISSEUR calculée de la couche (¹).	EFFET SUR LES FRAGMENTS de camphre.
17 Déc......	mgr 0,40	0,81	Pas d'effet appréciable.
11 Janv.....	0,52	1,06	A peine perceptible.
14 Janv.....	0,65	1,32	Pas tout à fait assez.
20 Déc......	0,78	1,58	Presque assez.
11 Janv.....	0,78	1,58	Juste assez.
17 Déc......	0,81	1,63	A peu près juste assez.
18 Déc......	0,83	1,68	Presque assez.
22 Janv.....	0,84	1,70	A peu près assez.
18 Déc......	0,95	1,92	Juste assez.
17 Déc......	0,99	2,00	Tous mouvements presque arrêtés.
20 Déc......	1,31	2,65	Assez.
		Un échantillon frais.	
28 Janv.....	0,63	1,28	A peine perceptible.
28 Janv.....	1,06	2,14	Juste assez.

(¹) *Voir* note, p. 52.

Il a semblé que l'estimation la plus précise de la quantité d'huile correspondait au moment où les mouvements sont presque arrêtés, sans l'être tout à fait. Il peut y avoir un peu d'incertitude pour préciser la mesure indiquée par « presque assez » et elle peut avoir légèrement varié dans diverses occasions. Mais les résultats sont tout

à fait nets, et, en tenant compte des circonstances, très concordants. L'épaisseur d'huile nécessaire pour faire cesser les mouvements du camphre est comprise entre 1 et 2 millionièmes de millimètre, et peut être estimée avec quelque précision à 1,6 micromillimètre. Les résultats préliminaires obtenus avec une surface de moindre étendue concordent avec ceux-ci.

Comme comparaison, il sera intéressant de remarquer que l'épaisseur des parties noires des pellicules d'eau de savon a été trouvée égale à 12 micromillimètres par MM. Reinold et Rücker.

Une importante question se présente, à savoir jusqu'à quel point on peut admettre que la surface de l'eau était propre au début. Je crois que toutes les surfaces d'eau sont d'ordinaire contaminées; mais la concordance des résultats indiqués dans le Tableau porte à croire que la couche initiale d'impureté n'est pas comparable avec celle qu'on y provoque à dessein. A la vérité, la difficulté des expériences a été bien moindre que je ne m'y attendais. Même une exposition de vingt-quatre heures à l'air du laboratoire ([1]) ne rend pas la surface de l'eau inapte à montrer les mouvements du camphre.

L'épaisseur des couches d'huile dont il est question dans ce travail est naturellement beaucoup plus faible que le rayon d'activité des forces de cohésion; on peut donc s'attendre à voir la tension de la surface huileuse différer de celle qui serait due à une membrane complète, et obtenue en ajoutant les tensions d'une surface eau-huile, et d'une surface huile-air. La détermination précise de la tension des surfaces huileuses n'est pas chose facile. Il est difficile d'employer un tube capillaire, parce qu'on ne pourrait pas être assuré que le degré d'altération est le même dans le tube qu'au dehors. On obtient de meilleurs résultats par l'ascension du liquide entre deux lames parallèles. Deux lames de verre, séparées à leurs coins par une mince feuille de métal, et pressées l'une contre l'autre près de leur centre, plongeaient dans le bain. Dans une expérience de cette espèce, la hauteur de l'eau pure fut trouvée égale à 62. Quand une faible quantité d'huile, à peu près suffisante pour arrêter les mouvements du camphre, eut été déposée à la surface de l'eau, elle s'étendit aussi sur la surface comprise entre les lames, et la hauteur s'abaissa à 48. Des additions subséquentes d'huile, même en quantité considérable, n'abaissèrent pas le niveau au-dessous de 38.

([1]) A la campagne.



L'effet d'une faible quantité d'oléate de soude est beaucoup plus considérable. Avec ce corps, la hauteur s'abaisse à 24, ce qui montre que la tension superficielle de l'eau de savon est beaucoup plus faible que les tensions combinées d'une surface eau-huile et d'une surface huile-air. D'après Quincke, ces dernières tensions sont respectivement 2,1 et 3,8 donnant par addition 5,9; celle d'une surface eau-air est 8,3. Quand de l'eau de savon est substituée à de l'eau pure, le dernier nombre tombe certainement au-dessous de la moitié de sa valeur, et doit dès lors être très inférieur à 5,9.

Note de Sir W. Thomson. — Les épaisseurs de la couche d'huile indiquées dans le Tableau précédent, comme résultats des recherches expérimentales de Lord Rayleigh, sont de 81 à 265 fois la limite inférieure et de 0,4 à 1,3 la limite supérieure que j'ai assignée pour la distance probable entre un point quelconque de l'eau ou d'un autre liquide ordinaire, et le point correspondant de la molécule la plus voisine. *Voir* plus loin, dans ce Volume, *Grandeur des atomes*.

W. T.

II.

UNITÉS ÉLECTRIQUES.

Conférence faite a l'Institution des Ingénieurs civils le 3 mai 1883; elle fait partie d'une série de six conférences sur *les Applications pratiques de l'Électricité.*

Etat actuel de la question. — Revue des progrès réalisés; Coulomb, Cavendish et Ampère; Gauss et Weber; Comité de l'Association britannique; Congrès de Paris. — Base du système absolu de Gauss : système C. G. S. — On peut se contenter de deux unités fondamentales, l'unité de longueur et l'unité de temps. — Ces unités sont indépendantes de la terre : comment on pourrait les retrouver si elles venaient à se perdre. — Le système pratique. — Résistance en mesure électromagnétique; en mesure électrostatique; la quantité « v ». — Utilité d'une unité de conductibilité. — Ce qu'il reste à faire.

Dans la science physique, un premier pas essentiel dans la marche vers la connaissance d'un sujet quelconque est la découverte de principes pour le calcul numérique, et de méthodes pratiques pour la mesure de quelqu'un des éléments liés au sujet. Je dis souvent que, si vous pouvez mesurer ce dont vous parlez et l'exprimer en nombres, vous savez quelque chose de votre sujet; mais si vous ne pouvez pas le mesurer, si vous ne pouvez pas l'exprimer en nombres, vos connaissances sont d'une pauvre espèce et bien peu satisfaisante; ce peut être le commencement de la connaissance, mais vous vous êtes à peine, dans vos pensées, avancés vers la *Science,* quel que puisse être le sujet. Je peux le montrer par l'examen d'un cas où ce premier pas n'a pas été fait. La dureté de différents solides, comme les pierres précieuses et les métaux, est mesurée par une simple épreuve comparative. Le diamant raye

le rubis, le rubis raye le quartz, le quartz, je crois, raye l'acier dur, et l'acier dur raye le verre; on considère, d'après cela, le diamant comme plus dur que le rubis; le rubis, que le quartz; le quartz, que l'acier dur; et l'acier dur, que le verre : mais nous n'avons pas de mesures numériques de la dureté de ces solides, ou d'autres quelconques. Nous ne connaissons, à vrai dire, les modules de rigidité ou de résistance à l'allongement, pour presque aucune des substances, gemmes ou minéraux, dont la dureté est évaluée par les minéralogistes au moyen de leur échelle comparative, qui commence au diamant, le plus dur de tous les solides connus. Nous n'avons même pas de raison de croire que le module de rigidité du diamant soit plus grand que celui des autres solides, et nous ne comprenons pas ce qu'est au juste cette propriété de la dureté, ni comment elle se rattache aux modules d'élasticité, ou à la résistance à l'allongement ou au cisaillement, ou aux qualités de la substance relativement à la façon dont elle supporte des efforts dépassant la limite de son élasticité. Il faut donc admettre que la science de la résistance des matériaux, d'une importance si capitale dans l'art de l'ingénieur, n'est que peu avancée, et que la partie qui a trait à ce qu'on appelle la *dureté* des différents solides est la plus arriérée, puisqu'on n'a pas fait un pas vers une mesure quantitative, ou une évaluation en nombres au moyen d'une unité définie.

Un semblable aveu aurait pu être fait il y a dix ans au sujet de la Science électrique, telle qu'elle était étudiée même dans les principaux laboratoires de physique du monde entier. Il est vrai que Cavendish et Coulomb, au siècle dernier, et au nôtre, Ampère, Poisson, Green, Gauss, Weber, Ohm, Lentz, Faraday, Joule, nous avaient donné les bases mathématiques et expérimentales d'un système complet d'évaluations numériques en Électricité et en Magnétisme, en Électro-Chimie et en Électro-Thermodynamique, et que dès 1858 on avait commencé à effectuer dans la pratique des mesures électriques définies, en essayant des résistances de cuivre, des résistances d'isolement, et des capacités inductives électrostatiques de câbles sous-marins. Mais quinze ans avaient passé sur ces débuts; et depuis dix ans, bobines de résistance et ohms, condensateurs

étalons et microfarads, étaient familiers aux électriciens des fabriques de câbles sous-marins et des stations d'essai, avant que quelque chose qu'on pût appeler *mesure électrique* eût été régulièrement pratiqué dans presque aucun des laboratoires scientifiques du monde. Je doute qu'il y a dix ans un simple constructeur ou marchand d'instruments scientifiques eût pu dire à ses clients si la conductibilité des bobines de ses galvanomètres était, par exemple, 60 pour 100 de celle du cuivre pur; je doute que les résistances d'une sur cent des bobines des électro-aimants, galvanomètres et autres appareils électromagnétiques appartenant aux Universités, aux laboratoires et aux établissements de conférences du monde entier, fussent connues des savants professeurs qui étaient chargés d'en expliquer les propriétés et d'en montrer les usages aux étudiants et aux élèves. Mais nous avons changé tout cela; aujourd'hui nous connaissons les résistances de nos bobines électromagnétiques, en général, mieux que nous ne connaissons leurs longueurs; et nos étudiants les moins avancés, dans les laboratoires de physique, sont tout à fait capables de mesurer des résistances avec une exactitude très grande dans des limites assez étendues. J'incline même à croire qu'avec les procédés employés d'ordinaire, ils seront probablement plus capables de mesurer des résistances comprises entre 100 et 10000 ohms avec une exactitude de $\frac{1}{1000}$, que d'être exacts à un millimètre par mètre dans leurs mesures de longueur. C'est à coup sûr un résultat très surprenant, qu'avec un phénomène aussi mystérieux, quand on a affaire à une qualité aussi subtile que la résistance électrique, qu'il est si difficile de définir et qui, comme nous allons l'apprendre, est une vitesse, tout commis dans une station télégraphique, les étudiants débutants et les aides dans les laboratoires, et même les ouvriers dans les usines d'éclairage électrique, soient parfaitement capables de mesurer (plus exactement qu'ils ne mesureraient la longueur de 3 mètres de fil) la résistance des conducteurs électriques en unités définies absolues.

Je pense, aussi, que tous les cabinets de physique et tous les laboratoires possèdent un microfarad, mais je crains que



sa généalogie ne soit souvent ignorée; et, si l'on attaquait son exactitude à 10 pour 100 près, je doute que, dans bien des cas, on pût compter pour la défendre, soit sur le constructeur, soit sur le possesseur, soit sur un autre électricien expert. Quant à nos appareils électrostatiques, j'avoue ne pas connaître la capacité d'une seule des deux ou trois douzaines de bouteilles de Leyde dont j'ai hérité en 1846, au cabinet de Philosophie naturelle de l'Université de Glasgow, ou que j'ai faites de temps à autre pendant les trente-sept ans qui se sont écoulés depuis lors. J'aime à croire que je suis seul à devoir faire un pareil aveu, et qu'aucun autre professeur de Philosophie naturelle au monde, ne laisserait placer sur la table de sa salle de conférences une bouteille de Leyde dont il ne pourrait indiquer à ses étudiants la capacité en mesure absolue. L'évaluation de la capacité d'une bouteille de Leyde en centimètres carrés de verre couvert, sans indication de l'épaisseur ni de la capacité inductive spécifique, devrait être une chose aussi démodée que l'évaluation des résistances en kilomètres de fil de cuivre ordinaire du commerce, pesant 3gr au mètre, sans indication de sa résistance spécifique (sa conductibilité spécifique est peut-être 45 pour 100? ou 70 pour 100? ou 98 pour 100? de celle du cuivre pur). Quant à la mesure pratique de la force électromotrice, il y a à peine un an que nous nous sommes dégagés de ce moyen âge où un volt et un élément Daniell étaient regardés comme pratiquement identiques, pour élever nos aspirations jusqu'à une exactitude de 1 pour 100 dans les mesures. Il semble, à la vérité, que les exigences commerciales de l'application de l'électricité à l'éclairage et à d'autres usages de la vie de tous les jours étaient destinées à provoquer, dans la science pratique des mesures électriques, un progrès non moins important et non moins précieux pour les plus hautes sphères de la recherche scientifique que celui qui fut réalisé il y a vingt ou trente ans, grâce aux exigences pratiques de la télégraphie sous-marine.

Il ne peut y avoir de plus grande erreur que de regarder avec dédain les applications pratiques de la Science. La vie et l'âme de la Science résident dans son application pratique; et de même que les grands progrès en Mathématiques ont été

réalisés grâce au désir de découvrir la solution de problèmes d'une nature hautement pratique pour la science mathématique, de même, dans les sciences physiques, beaucoup des plus grands progrès qui aient été réalisés, depuis le commencement du monde jusqu'à nos jours, sont dus à l'ardent désir de faire servir la connaissance des propriétés de la matière à quelque but utile à l'humanité.

Le premier pas vers une évaluation numérique des propriétés de la matière, au delà de la simple comparaison avec une série de types numérotés, comme l'échelle de dureté des minéralogistes, ou avec un étalon commercial arbitraire, comme la filière de Birmingham, est la découverte de quelque action variant d'une manière continue, ainsi que des moyens de l'observer d'une manière définie, et de la mesurer en unités arbitraires ou en divisions d'une échelle arbitraire. Mais ensuite, il est nécessaire de compléter la science des mesures dans chacune de ses parties; c'est-à-dire de fixer quelque chose de défini comme unité de mesure, fixation qui, en tant qu'elle se rapporte à la science électrique et magnétique, est le sujet de ma Conférence de ce soir.

En électricité, la théorie mathématique et les mesures de Cavendish, et en magnétisme, les mesures de Coulomb, donnèrent, il y a quelque cent ans, la base requise pour un système complet de mesures; et il y a cinquante ans, Ampère en fit autant pour l'électromagnétisme.

Je parle d'électricité, de magnétisme et d'électromagnétisme. Je dois dès à présent vous prévenir, comme d'une chose importante relativement à quelques-uns des détails techniques que nous aurons à considérer ultérieurement, que le magnétisme doit être regardé comme renfermant l'électromagnétisme. Électromagnétisme et magnétisme sont une seule et même chose. Les forces électromagnétiques et les forces électrostatiques, aujourd'hui très distinctes, sont deux genres d'action qu'une science plus approfondie nous conduira à réunir d'une manière que nous pouvons à peine entrevoir en ce moment. Nous possédons des bases, établies par Cavendish pour l'électricité, par Coulomb pour le magnétisme, et par Ampère pour l'électromagnétisme, et qui s'ac-

cordent parfaitement avec ce que j'aurai à vous dire plus tard, à propos des travaux de Gauss et de Weber, du magnétisme et de l'électromagnétisme. Je vous dis cela, parce qu'il y a eu une petite discussion au sujet de l'unité magnétique et de l'unité électromagnétique, comme si l'unité magnétique pouvait être autre chose que l'unité électromagnétique, ou l'unité électrocinétique. Les choses seront simplifiées, si vous considérez seulement une force magnétique, qu'elle soit due à un aimant d'acier ou à un fil conduisant un courant; et en ce qui concerne la mesure, n'établissez pas, dans le domaine de la science du magnétisme, de division qui comprenne l'électromagnétisme. Nous verrons qu'il y a deux questions capitales : d'une part l'électricité et la force électrostatique; d'autre part le magnétisme, l'électricité en mouvement à travers les conducteurs, et la force magnétique et électromagnétique. La première méthode complète de mesure scientifique pour quelques-uns de ces éléments est celle qu'a donnée Gauss dans son système de mesure absolue du magnétisme terrestre; c'est cette méthode, si magnifiquement appliquée par Gauss et Weber dans leur Société Magnétique de Gœttingue, qui a été le point de départ du système entier des mesures absolues, tel que nous le possédons actuellement, dans tout le domaine de la science électrique. En fait, Weber lui-même, après avoir réalisé des mesures absolues pour le magnétisme terrestre, en collaboration avec Gauss, les transporta dans le champ de l'électromagnétisme par ses *Elektrodynamische Maasbestimmungen* (¹), et de là dans l'électrostatique, par son travail en commun avec Kohlrausch sous le même titre, *Elektrodynamische Maasbestimmungen* (²). Ils ont trouvé approximativement 300000 kilomètres par seconde (³) comme valeur de cette quantité v

---

(¹) Leipzig; 1852. Une première publication d'une des parties les plus importantes de l'Ouvrage a été faite dans le Mémoire de Weber *Messungen galvanischen Leitungswiderstände nach einen absoluten Maasse* (*Annales de Poggendorff*, mars 1851).

(²) *Ann. Pogg.*, 10 août 1856.

(³) Le nombre donné par Weber et Kohlrausch est exactement 310740; mais d'après des recherches plus récentes, il est probable que ce nombre doit être

(vitesse), aujourd'hui célèbre, et qui, comme Maxwell l'a indiqué dans sa théorie électromagnétique de la lumière, n'est pas par le seul effet du hasard, à peu près égale à la vitesse de la lumière, mais est probablement, par l'intermédiaire des forces dont elle dépend, liée physiquement à l'action réelle ou au mouvement de la matière qui constitue la lumière.

Dès 1851, j'ai commencé à employer le système absolu pour évaluer les forces électromotrices des couples voltaïques, et les résistances électriques des conducteurs, en unités électromagnétiques absolues (¹); et après avoir, pendant dix ans, préconisé l'usage général du système absolu, à la fois pour les recherches scientifiques et pour les travaux de télégraphie, j'obtins en 1861 la nomination d'un Comité (²) de l'Association Britannique pour les étalons électriques.

Ce Comité, pendant près de dix ans encore, parcourut le champ entier des mesures électromagnétiques et électrostatiques, mais s'occupa principalement des étalons de résistance électrique, jusqu'au moment où dans son Rapport final présenté au Congrès d'Exeter en août 1869, il recommanda nettement l'usage général du système absolu; il prit des dispositions pour la fourniture de bobines de résistances étalonnées au moyen d'une unité, appelée d'abord *Unité de l'Association britannique* et plus tard *Ohm*, dont la résistance évaluée en mesure électromagnétique devait être aussi voisine que possible de 10000 kilomètres par seconde.

---

trop grand de 3 ou 4 pour 100. Voyez aussi l'Ouvrage de Gray *Absolute Measurements in Electricity and Magnetism* (Macmillan and C°, London, 1883).

(¹) *Voir* mes Mémoires *On the Mechanical theory of Electrolysis* et *Applications of the Principle of Mechanical Effect to the Measurement of Electromotive Force, and of Galvanic Resistances in Absolute Units*, publiés tous deux dans le *Philosophical Magazine*, déc. 1851, et qui constituent maintenant les articles LIII et LIV de la réimpression de mes *Mathematical and Physical Papers*, t. I, 1882.

(²) Les Rapports de ce Comité ont été publiés par intervalles, de 1861 à 1869, dans les volumes des Comptes rendus de l'Association Britannique pour les années correspondantes. Accompagnés d'autres contributions au même sujet, ils ont été réunis et publiés, sous la direction du professeur Fleeming Jenkin, par Spon, Londres et New-York, 1871.

A propos du nom d'*Ohm,* je dois dire qu'en 1861 Sir Charles Bright et M. Latimer Clark communiquèrent à l'Association Britannique un travail dans lequel ils proposaient, sauf quelques légères différences, les unités que nous possédons aujourd'hui; ils proposaient aussi un système complet et coordonné de mesures qui, certainement, ne remplissait pas toutes les conditions du système absolu, mais qui remplissait certaines d'entre elles d'une manière excessivement avantageuse pour les besoins de la pratique. C'est donc à Sir Charles Bright et à M. Latimer Clark qu'est dû le système entier d'unités tel que nous l'avons aujourd'hui, ohms, volts, farads et microfarads. Depuis 1870 ou 1871, le système absolu, avec la réalisation presque exacte qu'en donnait l'unité de l'Association Britannique, est d'un usage général en Angleterre et en Amérique; mais il s'est écoulé encore dix ans, et même davantage, avant l'adoption définitive du système absolu dans la pratique, en France, en Allemagne et dans les autres pays d'Europe, adoption ordonnée par le Congrès international pour la détermination des unités électriques, tenu à Paris en octobre 1882. On décida de ne pas accepter l'unité de l'Association Britannique. Des doutes s'étaient élevés sur son exactitude, et vous verrez qu'ils étaient fondés. Le Congrès s'occupait à trouver une base rigoureuse pour un système de mesures, et on inclinait à adopter le système absolu, quand se posa cette question : « Qu'est-ce que l'ohm? » Qui peut voir un ohm? Qui peut montrer ce que c'est qu'un ohm? Qui peut mesurer pour nous la résistance d'un conducteur d'après cette unité absolue de Weber? La détermination de Weber lui-même diffère grandement de celle de l'Association Britannique. Divers expérimentateurs, en essayant de vérifier ou de contrôler les mesures de l'Association Britannique, sont arrivés à des résultats discordants entre eux et qui, par conséquent, ne pouvaient confirmer celui de l'Association Britannique. Les choses en étaient à ce degré d'incertitude, et le Congrès avait à décider une question pratique très importante. Depuis dix ans au moins, on avait proposé d'établir une mesure exacte de la résistance électrique, en prenant pour construire l'étalon une substance pouvant être obtenue, au

moyen de précautions faciles à prendre, dans un état de pureté parfaite, ou assez voisin de la pureté parfaite, pour répondre pratiquement au but poursuivi. On avait proposé l'unité Siemens, fondée sur la résistance spécifique du mercure. La grande maison des Siemens (Berlin et Londres), notre distingué confrère, Sir William Siemens, et son distingué frère, le Dr Werner Siemens, ont travaillé cette question, la mesure des résistances en fonction de la résistance spécifique du mercure, d'une façon si complète et si efficace, qu'ils nous ont donné un étalon susceptible d'être reproduit en tout temps et en tout lieu, sans autre instrument de mesure que le mètre. Werner et William Siemens assistaient tous les deux au Congrès, et ils adhérèrent à la proposition d'adopter un système absolu, mais la question se posait de savoir par où l'on commencerait; la réponse adoptée par le Congrès fut de s'adresser, pour définir le système absolu, à une colonne de mercure. La colonne de mercure était le seul des étalons existants qui pût être reproduit autrement qu'en copiant simplement un fil; et elle fut naturellement acceptée comme la base sur laquelle serait établi un étalon, sinon une unité pratique pour l'usage courant. Voici donc, en un mot, ce que décida le Congrès : aussitôt qu'on aurait la certitude de posséder une mesure suffisamment approchée pour les besoins de la pratique, de la résistance d'un conducteur quelconque, morceau de fil ou colonne de mercure; aussitôt qu'une telle mesure aurait été faite, avec une exactitude notoirement suffisante pour les besoins de la pratique, on adopterait l'unité que l'Association Britannique s'était efforcée de réaliser; mais s'il était nécessaire de corriger l'ohm de l'Association Britannique ou l'unité Siemens, on laisserait à l'appréciation et à la convenance de ceux qui se servent des étalons le moment d'effectuer le changement destiné à faire mieux concorder les mesures avec les nombres absolus. Les travaux de Lord Rayleigh et Mrs Sidgwick ne permettent guère de douter que l'unité de l'Association Britannique ne soit inexacte de 1,3 pour 100. L'unité Siemens a l'avantage d'être assez approximativement égale à l'unité absolue cherchée, bien qu'elle n'ait pas été donnée le moins du monde comme

une unité absolue. C'était simplement la résistance d'une colonne de mercure à la température zéro, d'un mètre de longueur et de un millimètre carré de section. La reproduction de l'unité Siemens comportait de grandes difficultés, aux premiers temps des recherches; mais le Dr Werner Siemens, et Lord Rayleigh et Mrs Sidgwick, et bien d'autres encore, qui tous ont travaillé à la comparer avec l'unité de l'Association Britannique, ont obtenu des résultats ne laissant, en fin de compte, aucun doute sur la valeur exacte du rapport. Le Dr Werner Siemens a trouvé que l'unité mercurielle vaut 0,9536 unités de l'Association Britannique; Lord Rayleigh et Mrs Sidgwick ont trouvé 0,9542, ce qui est une concordance presque parfaite, puisque ce résultat diffère de $\frac{1}{1000}$ seulement de celui du Dr Werner Siemens. Un résultat différant de près de 1 pour 100 avait été obtenu par Matthiesen et Hockin un bon nombre d'années auparavant, alors que les précautions nécessaires pour reproduire l'étalon mercuriel avec une exactitude absolue n'étaient pas aussi bien connues qu'elles arrivèrent à l'être, peu d'années après leur travail. La conclusion finale du travail de Lord Rayleigh était que l'unité mercurielle Siemens est les 0,9413 de ce que le Congrès de Paris a convenu de définir comme l'ohm; c'est-à-dire la résistance mesurée par 1000000000 centimètres par seconde. J'ai peur que cela ne donne une étrange idée de la question, mais c'est parfaitement vrai, eu égard à la signification de la définition absolue de la résistance. J'aurai l'occasion de revenir plus tard sur ce sujet, au moment où je compte expliquer cette vitesse mystérieuse de 10^9 centimètres par seconde. Dans le cours des trente années écoulées depuis le moment où la Télégraphie commença à réclamer des mesures définies, on a fait une grande quantité de mesures exactes d'après des unités de résistance répondant à des définitions diverses. Un grand nombre de séries de bobines de résistances ont été construites par les frères Varley et d'autres constructeurs, et beaucoup d'expérimentateurs, dans leurs laboratoires, ont fait des étalons d'après lesquels on a construit des séries de bobines de résistance; mais, dans les douze dernières années, toutes ces unités ont disparu devant l'unité Siemens ou

l'unité de l'Association Britannique. L'unité de l'Association Britannique, comme je l'ai dit, était une tentative de mesure absolue, qui réussit à réaliser, à 1,3 pour 100 près, les 10^9 centimètres que l'on visait à obtenir. Les *copies* de l'unité de l'Association Britannique *étaient exactes à* $\frac{1}{1000}$ *près*. L'unité Siemens était fondée sur une autre idée, mais elle donna des résultats non moins définis et non moins commodes pour un très grand nombre d'applications pratiques, que ceux qu'on tira de la réalisation un peu plus approchée d'une unité absolue convenable effectuée par le Comité de l'Association Britannique.

Le principe sur lequel Gauss a fondé les mesures absolues relatives au magnétisme et à l'électricité est simplement une extension de la méthode astronomique d'évaluation des masses en fonction de ce que nous pouvons appeler l'*unité de matière* dans le *système gravitation universelle*, et de la méthode d'évaluation des forces adoptée à la fois par les astronomes et par tous ceux qui s'occupent de dynamique mathématique, méthode d'après laquelle l'unité de force est la force qui, agissant sur l'unité de masse pendant l'unité de temps, lui communique une vitesse égale à l'unité de vitesse. L'unité de masse dans le système gravitation universelle, est une quantité de matière telle que si deux quantités égales à celle-là sont éloignées l'une de l'autre d'une longueur égale à l'unité, la force qui s'exerce entre elles est égale à l'unité.

Je m'adresse à la méthode de la gravitation universelle pour la raison que voici. Il y a une évaluation des forces fondée sur la gravitation terrestre, d'après le poids de l'unité de masse; et, après tout, quand nous, créatures terrestres, nous prenons une masse dans notre main et en sentons le poids, c'est une sorte de mesure que nous faisons, et sans pouvoir l'éviter. Le kilogramme est une chose dont nous avons à nous servir; nous l'avons en notre possession, et nous ne pouvons nous empêcher de l'employer à faire, au moyen de son *poids*, des évaluations de forces. Par *unité de force dans le système gravitation locale*, j'entends le poids d'un gramme à Londres, à Glasgow, à l'équateur ou en tout autre endroit, et c'est une unité commode; mais la manière ordinaire de mesurer les

forces en les rapportant au poids, sans indiquer le lieu, n'est pas définie, parce que le poids d'un gramme n'est pas le même ici qu'à l'équateur. Le poids d'un gramme est plus grand de $\frac{1}{200}$ au pôle qu'à l'équateur; ou, pour donner les chiffres exacts, de 0,00512. C'est une différence de $\frac{1}{2}$ pour 100, et si vous voulez être exacts à $\frac{1}{2}$ pour 100 près, vous ne pouvez pas négliger la variation de la pesanteur en différents lieux. Mais un grand nombre de mesures dans l'art de l'ingénieur, et même dans les travaux de l'ordre le plus élevé des laboratoires scientifiques, ne prétendent pas à un aussi haut degré d'exactitude; pour tous les travaux de cette espèce, l'unité locale ou unité du système gravitation terrestre suffit, sans indication du point particulier où l'on se trouve; on sait seulement que l'on est quelque part ou ailleurs à la surface de la terre. Par exemple, les modules de rigidité, les modules de rupture, les charges de rupture des matériaux, sont donnés avec une exactitude suffisante pour les besoins de l'ingénieur, en tonnes par centimètre carré, ou en grammes par centimètre carré, ou de toute autre manière analogue. Toutes les mesures de cette espèce négligent les variations de la pesanteur aux divers lieux, à l'exception de certaines mesures plus précises, dans lesquelles on tient compte de l'intensité de la pesanteur, et on la ramène à une latitude normale de 45°, ou bien on laisse aux personnes qui se servent de la mesure, le soin de faire cette réduction. Néanmoins, dans tous les cas où il serait désirable de faire la correction de variation de la pesanteur, il est commode d'employer l'unité absolue de Gauss, et non l'unité de force du système gravitation terrestre. Je peux dire en passant que la simple idée qui se cachait, ou était mise en évidence, suivant l'intelligence qu'on en avait, dans la vieille formule de dynamique $F = m\frac{dv}{dt}$, était un pas immense; et la réalisation de cette idée, son introduction dans la pratique, a contribué plus que toute autre chose, à ma connaissance, à la mise en œuvre intelligente des problèmes de dynamique, et à leur application, soit aux questions scientifiques, soit aux questions intéressant l'art de l'ingénieur. Le système de Gauss pour la mesure absolue

de la force ne saurait être trop recommandé, comme un grand et important perfectionnement pratique apporté à la Science qui sert de base à l'art de l'ingénieur et à la Physique, la Science de la Dynamique. Il consiste simplement à définir l'unité de force comme la force qui, agissant sur l'unité de masse pendant l'unité de temps, engendre une vitesse égale à l'unité de vitesse. Il permet de choisir arbitrairement les unités de masse, de longueur et de temps; le gramme-masse, le centimètre et la seconde de temps solaire moyen, par exemple, comme dans le système C.G.S. généralement adopté aujourd'hui.

Mais le système de gravitation universelle usité en Mécanique céleste définit l'unité de masse en fonction de l'unité de longueur et de l'unité de force. Je n'ai pas besoin de répéter la définition. Voici donc deux définitions qui empiètent l'une sur l'autre : celle de l'unité de force, en fonction des unités de masse, de longueur et de temps; celle de l'unité de masse en fonction des unités de force et de longueur. On pourrait croire que nous faisons un cercle vicieux; mais il n'en est rien, les deux définitions dépendent logiquement et évidemment l'une de l'autre. Nous avons, pour ainsi dire, deux inconnues et deux équations; et l'élimination de l'une des inconnues entre les deux équations nous donne explicitement la seconde. Elles sont toutes deux mélangées d'une manière un peu embarrassante dans les définitions primitives, mais, si nous les démêlons, nous arrivons au résultat simple que je vais établir tout à l'heure, à deux définitions indépendantes de l'unité de masse et de l'unité de force, chacune en fonction des unités de longueur et de temps arbitrairement choisies.

Les unités de force et de masse ainsi définies sont essentiellement contenues, d'une manière implicite, dans toutes les formules relatives aux lois de l'Astronomie physique, depuis les plus élémentaires, qui apparaissent dans l'étude du mouvement elliptique sans perturbation, suivant les conclusions déduites par Newton des lois de Kepler, jusqu'à celles qu'on rencontre dans les développements les plus complets des théories de la Lune, des planètes ou des comètes, et de la précession et de la nutation de l'axe de la Terre; malgré cela,

il n'est pas d'usage, en Astronomie physique, de fonder sur ces unités un système de mesures numériques, ni même de choisir arbitrairement et définitivement des unités particulières de longueur et de temps comme bases des unités de force et de masse. Il est néanmoins intéressant, non seulement au point de vue de la philosophie dernière des systèmes de mesure, mais aussi à cause de tout ce qu'on peut en tirer, relativement aux propriétés de la matière, de développer en détail l'idée de n'employer que la longueur et le temps, comme unités fondamentales, dans la définition des unités de masse et de force. Ce faisant, nous trouvons immédiatement que le carré d'une vitesse angulaire est justement la mesure de la densité, ou masse par unité de volume; et que la quatrième puissance d'une vitesse linéaire est justement la mesure d'une force. On comprendra facilement la première de ces propositions, en se reportant à l'idée émise par Clerk Maxwell, de prendre comme unité fondamentale pour la mesure du temps la durée de la révolution d'un satellite décrivant une circonférence au voisinage immédiat de la surface d'un globe fixe, de densité égale au maximum de densité de l'eau. Modifions-la en adoptant une unité de temps arbitraire, elle nous fournira la base d'une mesure de la densité, avec cette particularité que la densité du globe est égale à la fraction $\frac{3}{4\pi}$ du carré de la vitesse angulaire de ce satellite, en radiants (1) par seconde; c'est-à-dire que le carré de la vitesse angulaire du satellite, multiplié par 3 et divisé par 4π, mesure la densité du globe. Ce peut être une idée difficile à accepter, mais plus elle est difficile, plus elle vaut qu'on la médite, et plus elle est instructive au point de vue des propriétés de la matière. Expliquez cela comme vous voudrez, il est certain que la densité de l'eau,

---

(1) Le radiant est l'unité au moyen de laquelle on exprime la vitesse angulaire. C'est un angle de $\frac{180}{\pi}$, environ 57°,3 (ou plus correctement 57°,2958). Ainsi une droite, ou rayon vecteur, tournant d'un angle de 57°,3 environ par seconde, se meut avec l'unité de vitesse angulaire; ou, si la droite fait un tour complet en une seconde, sa vitesse angulaire est 2π.

la densité du laiton, la densité moyenne de la Terre, sont mesurées, en mesure absolue, par le carré d'une vitesse angulaire. Je ne sais pas s'il est généralement connu que c'est Fourier qui a donné ces deux équations de dimension, contenues dans le Volume des Rapports de l'Association Britannique, dans l'Ouvrage de Clerk Maxwell, et dans le livre si utile d'Everett, *Unités et Constantes physiques*. La dimension de la densité, dans le système absolu de la gravitation universelle, est le carré d'une vitesse angulaire, c'est-à-dire, T^{-2}. Il est également curieux et surprenant, que la quatrième puissance d'une vitesse linéaire serve de mesure à une force; c'est ce que nous avons à examiner maintenant (1).

La méthode d'évaluation des forces dans le système gravitation universelle, qui consiste, comme nous allons le voir, à les mesurer par la quatrième puissance d'une vitesse linéaire, peut être expliquée de la manière suivante. Cherchons la vitesse initiale qu'il faut donner à une particule de matière, pour qu'elle décrive une circonférence autour d'une particule égale, fixée à une distance telle, qu'elle l'attire avec une force égale à la force donnée (2). La quatrième puissance de cette

---

(1) On peut arriver très rapidement à ces conclusions de la manière suivante : Désignons par L, M, T, F les unités de longueur, de masse, de temps et de force. Dans le système C.G.S., F est définie par l'équation aux dimensions

$$F = MLT^{-2}; \tag{1}$$

dans le système de la gravitation universelle, F est définie par

$$F = M^2L^{-2}. \tag{2}$$

L'élimination de M entre ces deux équations conduit à

$$F = L^4T^{-4};$$

la force se mesure par la quatrième puissance d'une vitesse linéaire.

L'élimination de F entre les mêmes équations donne

$$M = L^3T^{-2};$$

mais, la densité étant la masse par unité de volume, les dimensions de la densité s'expriment par ML^{-3}. La dimension de la densité est donc T^{-2}, ou le carré d'une vitesse angulaire. (P. L.)

(2) Des considérations mécaniques très simples conduisent à ce résultat.

Soit un mobile M, de masse m, attiré par un point O de masse égale, suivant

vitesse est le nombre qui mesure la force. Une force 16 fois plus grande, donnera une vitesse double; une force 81 fois plus grande, donnera une vitesse triple, et ainsi de suite.

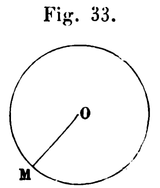
Maintenant, si j'allais vous dire que le poids de ce morceau de craie est la quatrième puissance de 20 kilomètres à l'heure, on me considérerait comme bon, non à occuper cette place, mais à être envoyé dans un asile d'aliénés. Vous me croiriez presque tous simplement idiot, je le suppose, si j'allais dire que le poids de ce morceau de craie est la quatrième puissance de 7^m^ ou 8^m^ par heure; et, cependant, ce serait parfaitement raisonnable.

Imaginez maintenant un satellite infiniment petit tournant autour de la Terre. Vous demandez : qu'est-ce qu'un satellite infiniment petit? Pour être « infiniment petit », dans le cas actuel, ce corps devra être assez petit en comparaison de la Terre pour ne déterminer aucun mouvement sensible par sa réaction sur la Terre. Ainsi un boulet de 500^kg^ est un satellite infiniment petit; quoique, peut-être, il ne soit pas infiniment petit à tous les points de vue. Naturellement, la résistance de l'air devra être nulle. Maintenant, tirez le boulet

---

la loi de Newton. Soit r la distance OM, telle que la force d'attraction, $\frac{m^2}{r^2}$, soit égale à une force donnée F. La vitesse initiale v qu'il faut donner à M pour qu'il décrive une circonférence autour de O doit être perpendiculaire à la direction

Fig. 33.



initiale de la ligne OM; l'accélération centripète est constante, le mouvement est donc uniforme, et on a

$$F = \frac{mv^2}{r}$$

et, comme $F = \frac{m^2}{r^2}$,

$$\sqrt{F} = v^2, \qquad F = v^4. \qquad \text{(P. L.)}$$

avec une vitesse telle qu'il ait une trajectoire très tendue, ni plus ni moins courbe que la Terre, et il continuera à tourner autour de la Terre. Trouvez la vitesse avec laquelle vous devrez lancer le boulet pour l'obliger à tourner autour de la Terre et, si la résistance de l'air est nulle, vous aurez réalisé notre satellite infiniment petit. Cette expression, quelque peu pédante, est justifiée par ce fait que les trois mots « satellite infiniment petit » remplacent trois ou quatre phrases; c'est là notre excuse.

La demi-période de révolution d'un satellite infiniment petit tournant autour de la Terre, et au voisinage immédiat de sa surface ([1]), est égale à la demi-période d'oscillation complète d'un pendule simple de longueur égale à celle du rayon de la Terre, et ayant son extrémité pesante infiniment

---

([1]) Imaginons un satellite infiniment petit de masse m tournant autour d'un globe de rayon r et de densité ρ. La masse du globe est $\frac{4}{3}\pi r^3\rho$; la force attractive est la même que si cette masse était concentrée au centre. La relation bien connue entre la force centripète, qui est ici $\frac{\frac{4}{3}\pi r^3\rho m}{r^2} = \frac{4}{3}\pi r\rho m$, et la vitesse angulaire ω, conduit à l'équation

$$\frac{4}{3}\pi r\rho m = m\omega^2 r,$$

d'où

$$\rho = \frac{3}{4\pi}\omega^2.$$

Soit un pendule simple de longueur r oscillant tout contre la surface de la Terre, dont nous désignerons le rayon par r. La force attractive est $\frac{4}{3}\pi\rho r m$, si m désigne la masse du pendule; l'accélération est $\frac{4}{3}\pi r\rho$. La demi-période d'oscillation complète est donc

$$t = \pi\sqrt{\frac{r}{\frac{4}{3}\pi r\rho}} = \sqrt{\frac{3\pi}{4\rho}}.$$

La durée de révolution du satellite précédemment considéré est $T = \frac{2\pi}{\omega}$ ou, d'après la valeur de ω,

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{3}{4\pi\rho}} = 2\sqrt{\frac{3\pi}{4\rho}} = 2t;$$

la demi-durée de la révolution du satellite considéré est égale à la demi-durée d'oscillation complète d'un pendule simple de longueur égale au rayon de la Terre et oscillant tout près de sa surface. (P. L.)

Voir aussi THOMSON et TAIT, *Philosophie naturelle*, 2[e] édition, t. I, 1[re] Partie, § 223.

près de la surface de la Terre; donc, si on l'exprime en secondes, elle est approximativement égale à la racine carrée du nombre de mètres (6370000) qui mesure le rayon terrestre, puisque la longueur du pendule à seconde (dont la demi-durée d'oscillation complète est une seconde) est très approximativement de 1^m. Nous trouvons ainsi 2524 secondes de temps solaire moyen pour la demi-période du satellite, et cette vitesse angulaire en radiants par seconde est par conséquent $\frac{\pi}{2524} = 0,001244$: d'après cela, la densité moyenne de la Terre, évaluée dans le système de la gravitation universelle, avec la seconde de temps solaire moyen comme unité de temps, est $0,001244^2 \times \frac{3}{4\pi} = 3,7 \times 10^{-7}$; et si nous prenons (d'après la répétition par Baily de l'expérience de Cavendish) [1] la densité moyenne de la Terre comme égale à 5,67 fois le maximum de densité de l'eau, nous trouvons $6,53 \times 10^{-8}$ pour le maximum de densité de l'eau dans le système de la gravitation universelle. Pour mesurer la masse nous devons maintenant introduire une unité de longueur; si nous prenons le centimètre nous trouvons, la masse d'un centimètre cube d'eau au maximum de densité étant très approximativement égale à celle qu'on appelle le *gramme*, que l'unité de matière du système gravitation universelle vaut

$$\frac{1}{6,53 \times 10^{-8}} = 15,3 \times 10^6 \text{ grammes-masse,}$$

ou 15,3 tonnes-masse; d'après cela, l'unité de force du système gravitation universelle vaut $15,6 \times 10^3$ grammes, ou 15,6 fois le poids terrestre de 1 kilogramme [2].

---

(1) M. Cornu a critiqué la méthode employée par Baily pour tenir compte de l'amortissement des oscillations du fil de torsion dû à la viscosité. Il a exprimé l'opinion que le résultat de Baily, s'il avait été calculé d'après des principes tout à fait corrects, aurait été en complet accord avec le sien propre, soit 5,55.

(2) L'unité de force considérée est celle qui communique à la masse de $15,3 \times 10^6$ grammes une accélération égale à l'unité; or, une force de $15,3 \times 10^6$ grammes communique à la même masse une accélération égale à 981. Le rapport de l'unité considérée au gramme est donc $\frac{15,3 \times 10^6}{981} = 15,6 \times 10^3$. (P. L.)

15,3 tonnes-masse représentent donc l'unité de matière dans le système gravitation universelle. Il pourra venir un temps où ce système gravitation universelle sera le système de mesures; quand 15,3 tonnes-masse constitueront l'unité de matière, et quand les subdivisions décimales de 15,3 tonnes-masse formeront notre système métrique, les grammes pourront être aussi démodés que le sont aujourd'hui les grains.

Il y a quelque chose d'excessivement intéressant à constater qu'il est possible de fonder pratiquement un système de mesures sur une unité de longueur et une unité de temps. Il n'y a là rien de neuf, puisqu'on le sait depuis l'époque de Newton, mais ce sujet présente un intérêt toujours nouveau. La seule idée d'une telle possibilité est pleine d'enseignements pour la Science, enseignements qui ont été à peine aperçus jusqu'à présent, spécialement en ce qui concerne les propriétés intimes de la matière. Le gramme, il faut s'en souvenir, est fondé sur les propriétés d'un corps déterminé, l'eau; mais ici, sans invoquer aucune espèce particulière de matière, en choisissant une certaine longueur définie marquée sur une règle à mesurer et une unité de temps (nous allons voir tout à l'heure comment on les obtient), nous pouvons prendre une portion de matière et dire comment, en un point quelconque de l'univers, on peut mesurer sa masse en unités définies absolues.

Considérons maintenant les deux unités dont dépend le système de mesures de la gravitation universelle : l'unité de longueur et l'unité de temps. L'unité de longueur est simplement la longueur d'un certain morceau de laiton, ou de toute autre substance solide employée à faire une règle à mesurer, ou la longueur comprise entre deux traits tracés sur ce solide; ce pourra être un mètre ou un centimètre, ou n'importe quoi, le principe est le même. Le mètre, il est vrai, a été pris à l'origine, aussi exactement que possible, égal au dix-millionième d'un certain quadrant terrestre, estimé avec toute l'exactitude possible, d'après les opérations géodésiques exécutées en 1792 par Méchain et Delambre pour asseoir les bases du système métrique. Mais on obtint ainsi simplement le mètre type original, et ce qu'on appelle maintenant *mètre* est une longueur

égale à celle de l'étalon ou d'une de ses copies authentiques faite avec autant de soin que possible; et la centième partie du mètre ainsi défini est le centimètre que nous adoptons définitivement comme unité de longueur.

Ainsi, notre unité de longueur est indépendante de la Terre et parfaitement portative, de sorte que le voyageur scientifique errant dans l'univers porte avec lui sa règle de mesure; et il n'a plus à s'occuper de la Terre, en ce qui concerne ses mesures d'étendue. Mais que dire de la seconde de temps solaire moyen, en fonction de laquelle il mesure le temps? Comment faire s'il a quitté la Terre pour toujours; ou si, même sans la quitter, il poursuit son œuvre scientifique pendant quelques millions d'années au cours desquelles la durée de la rotation de la Terre autour de son axe et la durée de sa révolution autour du Soleil seront devenues toutes deux différentes de ce qu'elles sont maintenant? S'il prend avec lui une bonne montre ou un chronomètre dont la marche aura été bien déterminée avant qu'il quitte la Terre, l'instrument, tant qu'il durera, pourra répondre à ses besoins. Ce qu'il fait, c'est simplement compter les oscillations d'une certaine masse sous l'influence d'un certain ressort (le balancier sous l'action du spiral). Si pour une expérience séculaire qu'il a entreprise, il désire mesurer constamment le temps, il devra laisser toujours marcher sa montre, et aucune oscillation ne devra manquer au compte fait par les aiguilles. Mais s'il veut simplement garder son unité de temps, et être tout à fait certain que dans un certain nombre de millions d'années elle aura, à $\frac{1}{1000}$ près, sa valeur actuelle, qu'il prenne un oscillateur mieux disposé, pour la constance et l'exactitude absolues, que le balancier d'une montre ou d'un chronomètre avec son ressort spiral. Un diapason d'acier dont la période de vibration aura été déterminée pour lui, avant son départ, par le professeur Macleod ou par Lord Rayleigh conviendra à cet usage. La mesure de la période en fonction de la seconde de temps solaire moyen, les branches étant dirigées successivement vers le haut, horizontalement, et vers le bas, le mettra en état d'éliminer l'influence très faible de la gravité terrestre; il aura avec lui un étalon de durée qui lui donnera la seconde de

temps solaire moyen, aussi exactement que sa règle à mesurer lui donne le centimètre, et cela en quelque point de l'univers, à quelque moment, aujourd'hui ou dans des millions d'années, qu'il ait à se servir de ses instruments.

Vous ne m'accuserez pas, je l'espère, d'abuser de votre bienveillance par de pures frivolités, si je vous demande d'arrêter encore un peu votre pensée sur les unités qui forment le bagage de notre voyageur idéal, parti pour une exploration scientifique à travers l'Univers. Pour moi, le moyen le plus court et le plus sûr d'atteindre la philosophie de la science des mesures, une juste compréhension de ce que nous entendons par mesure, chose essentielle pour la pratique intelligente du simple art de mesurer, c'est, je crois, de rompre tout lien avec la Terre, et de songer à ce qu'il faudrait faire pour effectuer des mesures qui pussent être comparées d'une manière définie avec celles que nous faisons actuellement, dans nos ateliers et nos laboratoires terrestres. Supposez donc que le voyageur ait perdu sa montre, et son diapason, et sa règle de mesure, mais qu'il ait gardé ses livres scientifiques, ou à tout le moins, qu'il ait dans son esprit un souvenir complet et une pleine intelligence de leur contenu : comment va-t-il retrouver son centimètre et sa seconde de temps solaire moyen ?

Occupons-nous d'abord du centimètre. En quelque lieu que soit notre voyageur, qu'il fasse un morceau de verre semblable à celui que je tiens à la main ; il est sûr d'en trouver les matériaux en quelque région habitable de l'Univers que le hasard l'ait conduit ; qu'avec un diamant, ou un morceau d'acier dur, ou un morceau de pierre à fusil, il trace sur ce verre un millier de traits parallèles équidistants, sur un espace qui ait environ la largeur de son pouce, largeur qu'il pourra prendre comme unité de longueur temporaire ou provisoire. Il pourra s'aider, pour graver le verre, d'une vis taillée dans du laiton ou de l'acier, et qu'il pourra faire facilement bien qu'il n'ait pas d'outils, pas même d'instruments en silex, au début de son travail. Avec un peu de temps et de persévérance il fera les outils nécessaires. Qu'il fasse encore une règle de mesure temporaire et marque sur elle des divisions égales, d'une

longueur commode, n'ayant d'ailleurs aucun rapport nécessaire avec l'unité provisoire qu'il a choisie. Qu'il fasse deux chandelles, qu'il les allume et les place, comme vous voyez celles qui sont à présent sur la table, à une distance convenable qu'il évaluera au moyen de sa règle de mesure. Il tient dans sa main, tout près de son œil, le morceau de verre rayé, comme je tiens celui-ci, et voit deux rangées de spectres colorés ayant chacun en son centre une des chandelles. Il tourne le verre jusqu'à ce que les deux rangées de spectres soient sur la même ligne, et règle l'orientation de son plan de façon à rendre minima la distance d'un spectre à l'autre. Il le recule et l'avance, comme je fais maintenant, gardant son œil à égale distance des deux chandelles, jusqu'à ce qu'il voie chacune d'elles sur le point de sortir du jaune moyen d'un spectre de l'autre, aucun spectre n'étant entre les deux. Cette condition réalisée, il mesure la distance du réseau aux chandelles. Alors, d'après la théorie de la diffraction, il a la proportion suivante : La distance du réseau aux chandelles est à la distance des chandelles, comme la distance de centre à centre des divisions du verre est à la longueur d'onde de la lumière jaune. Il se souvient que celle-ci est $5,892 \times 10^{-5}$ centimètres, et trouve ainsi en centimètres la longueur de son unité provisoire.

[Une expérience rapide destinée à montrer combien il est facile d'effectuer cette détermination, le réseau une fois construit, fut faite au cours de la conférence sans aucun autre appareil qu'un petit morceau de verre sur lequel étaient gravées 250 fines lignes parallèles, deux chandelles, et un ruban de mesure portant des divisions de longueur inconnue (employé seulement pour mesurer le rapport des distances). Le résultat donna pour la distance de centre à centre des divisions consécutives du réseau 32 fois la longueur d'onde de la lumière jaune. La largeur de l'espace sur lequel étaient tracés les 250 traits du réseau était évaluée ainsi à

$$250 \times 32 \times 5,892 \times 10^{-5} = 0,47 \text{ centimètre.}$$

D'après le constructeur, cette largeur était de un demi-centimètre.]

Vous voyez ainsi qu'au moyen de cette expérience faite à la hâte, avec cet appareil grossier, nous avons pu mesurer exactement une longueur à quelques centièmes près. Quelques minutes de plus consacrées à l'expérience, l'emploi de flammes de sodium placées derrière des fentes fines, au lieu de chandelles épanouissant dans l'air leurs flammes nues, et une détermination plus soignée du rapport des distances, nous auraient facilement donné un résultat exact à $\frac{1}{2}$ pour 100 près. Le voyageur cosmique pourra ainsi retrouver facilement son centimètre et son mètre.

Mais comment va-t-il retrouver la seconde de temps solaire moyen, en supposant qu'il ait perdu son diapason? Il peut songer à la vitesse de la lumière et répéter l'expérience de Fizeau. C'est une opération qu'on peut faire d'un bout à l'autre, sans avoir au début d'autre secours que celui d'outils tranchants et de morceaux de métal. Qu'il prenne un morceau de laiton, et façonne une roue dans laquelle il taillera deux mille dents. Je ne sais pas combien de dents a employées Fizeau, mais notre voyageur peut exécuter la série complète des opérations et donner à la roue un mouvement uniforme (de vitesse inconnue puisqu'il ne peut compter le temps); il exprimera la vitesse de la roue en fonction de la vitesse de la lumière, qu'il sait être d'environ 300000^{km} par seconde. Si notre voyageur scientifique est muni de solides connaissances en électricité, et ce soir nous sommes obligés de supposer qu'il en est ainsi, il songera à « v » ou à l'ohm. Il peut faire une unité Siemens; il le peut, parce qu'il a son centimètre et qu'il trouvera partout du mercure et du verre. Qu'il exécute alors ce qu'ont fait Lord Rayleigh et Mrs Sidgwick. Au moyen d'un chronomètre ou d'un oscillateur temporaire, il obtiendra une unité de temps provisoire, et il effectuera la suite des opérations qu'entraîne la détermination de la résistance d'une unité Siemens en mesure absolue, d'après son unité de temps provisoire. Son expérience lui donne une vitesse, par exemple, en kilomètres par unité de temps provisoire, comme valeur de l'unité Siemens en mesure absolue. Il sait d'après Lord Rayleigh et Mrs Sidgwick, que l'unité Siemens en valeur absolue est 9413^{km} par seconde de temps solaire moyen; il trouve ainsi

le rapport exact de son unité de temps provisoire à la seconde de temps solaire moyen.

Toutefois, quoique cette méthode soit choisie comme étant la plus commode et la plus exacte pour retrouver la seconde de temps solaire moyen, eu égard à la connaissance que l'on a aujourd'hui des données fondamentales, la méthode au moyen de v est trop intéressante et trop instructive, au point de vue de l'élimination des propriétés de la matière de nos bases métriques définitives, pour que nous la passions sous silence. Une manière très simple de déterminer expérimentalement v peut être déduite d'une importante idée qu'ont suggérée Clark et Bright dans le travail dont j'ai parlé plus haut. Prenez une bouteille de Leyde, ou tout autre condensateur dont la capacité, pas trop grande (par exemple, en mesure électrostatique, d'environ 1000 centimètres) devra être mesurée avec soin. Disposez un mécanisme qui permette de le charger à un potentiel exactement connu de valeur pas trop grande (par exemple, en mesure électrostatique, d'environ 10 C.G.S. c'est-à-dire environ 3000 volts) et de le décharger à travers la bobine d'un galvanomètre, à des intervalles fréquents et réguliers (par exemple, dix fois pendant une unité de temps convenablement choisie). Cela donnera un courant intermittent d'intensité moyenne connue $\Big($dans l'exemple choisi, 10^5 unités électrostatiques C.G.S., ou environ $\frac{1}{300000}$ d'unité électromagnétique C.G.S., ou $\frac{1}{30000}$ d'Ampère$\Big)$, qui devra être mesurée en unités électromagnétiques par un galvanomètre ordinaire. En divisant la mesure électrostatique du courant par la mesure électromagnétique du même courant fournie par l'expérience, on aura la valeur de v en centimètres par unité de temps; il s'agit de l'unité de temps arbitraire que l'expérimentateur à la recherche de la seconde de temps solaire moyen a employée dans ses opérations électrostatiques et électromagnétiques. L'unité de masse, qu'il a aussi choisie arbitrairement, disparaît du rapport final.

Mais il y a une autre méthode excessivement intéressante, à

laquelle, bien que je ne la considère pas comme étant la plus pratique, s'attache un très grand intérêt, parce qu'elle permet de tout faire en une seule série d'opérations : c'est la méthode des oscillations électriques (1). J'aimerais beaucoup à voir comment une personne qui aurait perdu ses étalons de mesure, et qui aurait retrouvé son centimètre (ce qu'elle ferait certainement au moyen de la longueur d'onde de la lumière), arriverait à retrouver son unité de temps par la méthode suivante. Prenez un condensateur, une très grande bouteille de Leyde; électrisez-le, et réunissez les deux armatures par l'intermédiaire d'un conducteur disposé de manière à avoir une inertie électromagnétique, pour ainsi dire (2), une self-induction électromagnétique, aussi grande que possible. La méthode est donnée dans *Electricity and Magnetism* de Clerk Maxwell (Vol. II, Chap. XIX). Il serait trop long d'en exposer les détails; mais lisez la partie mathématique dans Clerk Maxwell, lisez le Volume des rapports sur les étalons de mesures électriques de l'Association Britannique, lisez *Unités et Constantes physiques* d'Everett; apprenez tout cela par cœur du premier mot au dernier, et vous vous instruirez avec bien moins de peine qu'en m'écoutant. Prenez une bobine de résistance dont la forme corresponde au maximum d'inertie électromagnétique (3), et déchargez le condensateur à travers cette bobine : ou plutôt provoquez la décharge du conducteur à travers une telle bobine, et vous aurez une série d'oscillations suivant exactement la même loi que les oscillations du niveau de l'eau

---

(1) Voyez mes Mémoires *On transient electric currents* (*Glasgow Philosophical Society Proceedings*, t. III, janvier 1853, et *Philosophical Magazine*, juin 1853), constituant maintenant l'article LXII de la réimpression de mes *Mathematical and physical Papers*, t. I, 1882.

(2) Voyez à ce sujet mon Mémoire *On the mechanical value of distributions of Electricity, Magnetism and Galvanism*, lu devant la Société Philosophique de Glasgow, janvier 1853, et publié dans ses *Proceedings*, t. III, à cette date; voyez aussi l'article *Dynamical relations of Magnetism* dans *Cyclopædia of the physical Sciences* de Nichol, 2e édition, 1860. Ces deux Mémoires, avec additions en date de juillet 1882, constituent l'article LXI de la réimpression de mes *Mathematical and physical Papers*, t. I, 1882.

(3) Voyez *Traité d'Électricité et de Magnétisme*, par Clerk Maxwell, t. II, p. 393 de l'édition française.



dans deux réservoirs où les niveaux seraient au début à des hauteurs inégales, et qu'on réunirait par un tube en U. Imaginez deux pareils réservoirs remplis d'eau, et reliés par un tube en U muni d'un robinet, le niveau de l'eau étant plus élevé dans l'un des réservoirs que dans l'autre : ouvrez brusquement le robinet, l'eau va commencer à descendre dans l'un des réservoirs et à s'élever dans l'autre. L'inertie de l'eau ainsi forcée de couler dans le tube en U est cause qu'elle coulera encore après avoir atteint le niveau moyen dans les deux réservoirs, et atteindra un niveau plus élevé dans celui où elle était le plus bas au début, tandis qu'elle s'abaissera au niveau correspondant dans l'autre. Ainsi le niveau de l'eau dans chaque réservoir sera alternativement au-dessus et au-dessous du niveau moyen : l'amplitude du mouvement diminuera graduellement en vertu de la viscosité de l'eau, jusqu'à ce qu'après une ou deux douzaines d'oscillations cette amplitude soit devenue assez faible pour que vous ne puissiez plus l'apprécier. C'est précisément ce qui arrive quand on décharge un condensateur à travers une bobine de résistance de grande inertie électromagnétique, la résistance du fil de cuivre étant comparable à la viscosité dont l'influence détermine l'amortissement des oscillations. Si dans le cours de ses investigations à travers l'Univers, notre voyageur pouvait rencontrer un métal qui fût environ un million de fois plus conducteur que le cuivre, il ferait beaucoup plus facilement cette expérience; mais elle est possible avec le cuivre. Il est certain, d'après les observations faites par Feddersen, par Schiller et par d'autres, qu'on peut observer un grand nombre d'oscillations, et que la période, ou la demi-période d'oscillation, peut être déterminée avec une grande exactitude.

Si notre voyageur scientifique désire déterminer une fois pour toutes son unité de temps au moyen de cette belle expérience, il devra procéder ainsi. Qu'il prenne une bobine dont il connaîtra parfaitement les dimensions, pour avoir déjà exécuté la série des opérations préliminaires qui donnent la mesure de ses dimensions électriques; ou, s'il ne peut pas les mesurer avec une exactitude suffisante (et il est extrêmement difficile de trouver par des mesures les dimensions caractéris-

tiques d'une bobine au point de vue électrique), qu'il le fasse, partie en mesurant directement sa longueur ou les dimensions linéaires de la figure suivant laquelle elle est enroulée, et partie en la comparant, au point de vue électromagnétique, avec d'autres bobines. Par des recherches soigneusement faites, il pourra trouver l'inertie électromagnétique de la bobine en fonction de son centimètre. Et ici, il y a encore une curieuse espèce d'énigme, et une absurdité apparente, à dire que l'équivalent de l'inertie électromagnétique d'une bobine est une longueur, et qu'elle est mesurée par un certain nombre de centimètres. Que notre voyageur fasse un condensateur, et, en l'agrandissant de plus en plus, qu'il détermine sa capacité en mesure électrostatique. Qu'il commence par deux plateaux, ou deux cylindres, ou une sphère enfermée dans une sphère concentrique, et que par un procédé de multiplication il arrive à obtenir un condensateur d'une capacité suffisamment grande dont il connaîtra la valeur en unités électrostatiques. C'est encore une ligne. Qu'il prenne maintenant le rectangle ayant ces deux lignes pour côtés, qu'il construise le carré équivalent, en prenant, soit géométriquement, soit arithmétiquement, la racine carrée du produit des deux lignes, et qu'il observe la période des oscillations électriques dont j'ai parlé. Qu'il imagine l'aiguille d'une montre faisant un tour dans la période observée. Il a de bons yeux magnétiques, et il voit les oscillations électromagnétiques, ou il a des appareils au moyen desquels il peut les apprécier : la chose a été faite. Il met en mouvement une petite pièce d'un rouage muni d'une aiguille faisant un tour pendant la durée d'une oscillation. Imaginez maintenant pour un instant que cette aiguille ait une longueur égale à la racine carrée du produit des deux lignes considérées, plusieurs millions de centimètres, ou plusieurs milliers de kilomètres, si la bobine et le condensateur ont des dimensions convenant à l'expérience réelle, telle que nous la ferions, nous, habitants de la Terre. La vitesse de l'extrémité de l'aiguille est v. Il a donc cette étonnante quantité v. Il a une aiguille qui fait un tour dans un temps déterminé, et il sait que si cette aiguille a la longueur qu'il a calculée, la vitesse de son extrémité est v. Voilà qui est

intéressant et instructif, et bien que je ne tienne pas pour certain que le procédé soit *très* pratique, il l'est encore suffisamment, je crois, pour mériter qu'on y réfléchisse. Je pense que ce sera une des manières de déterminer cette merveilleuse quantité v.

Il faut espérer qu'avant longtemps on connaîtra v, en centimètres par seconde de temps solaire moyen, à $\frac{1}{1000}$ près. Aujourd'hui on sait seulement qu'elle ne diffère *probablement* pas de 1 pour 100 de 3×10^{10} centimètres par seconde de temps solaire moyen. Quand on la connaîtra avec une exactitude suffisante, un expérimentateur muni d'un centimètre pourra, en tout point de l'Univers, estimer les indications de son chronomètre d'expériences en secondes de temps solaire moyen, au moyen des simples opérations électrostatiques et électromagnétiques décrites ci-dessus, sans consulter le Soleil ni aucun autre chronomètre naturel ([1]).

Je crains d'avoir mis trop longtemps déjà votre patience à l'épreuve, et je viens seulement d'arriver au début de mon sujet. Il faut maintenant commencer à examiner les unités

---

([1]) Toutes ces méthodes supposent la permanence des propriétés du milieu si peu connu qui propage les phénomènes optiques et électriques. En particulier, la fabrication du centimètre suppose non seulement que les propriétés de la molécule de sodium sont conservées, et que sa *période* vibratoire n'a pas été modifiée, mais encore, pour passer à la longueur d'onde, que la vitesse de propagation est la même dans le vide au point de l'Univers où se trouve l'observateur vagabond qu'à la surface de la Terre. On pourrait proposer les moyens de restitution suivants, purement thermodynamiques : 1° On se procure de l'eau, et on la soumet à une pression telle que le *rapport* des volumes occupés par la même masse d'eau à l'état de vapeur saturante et à l'état de glace sous cette même pression soit $\frac{0,92}{0,000606} = 1520$; la *pression* est alors celle que nous appelons *une atmosphère* $1,014.10^6$ *C.G.S.*; toute la thermométrie est retrouvée. Au bout d'un tube effilé dont la pointe est plongée au milieu de l'eau, soufflons une petite bulle d'air, jusqu'à ce que l'excès de la pression interne sur la pression externe soit 0,003 de celle que nous venons de reconstituer; le diamètre de la bulle est 1 millimètre; ce qui nous permet de remonter de l'unité de pression à l'unité de force. Décomposons cette eau, et extrayons l'hydrogène; plaçons-le dans un tube entouré de glace fondante, et faisons-le vibrer, nous reconstituons la *vitesse* de propagation du son dans l'hydrogène à 0°, et par conséquent la seconde, si notre tube a $1,26.10^6$ millimètres de longueur.

(M. B.)

électriques de mesure. Je n'ai pas besoin de définir ces quantités l'une après l'autre, électrostatiquement et électromagnétiquement; vous trouverez toutes ces définitions dans Everett, et dans le Volume de l'Association Britannique où sont réunis les rapports du premier Comité pour les mesures électriques. Ce n'est pas à moi de vous parler de l'ohm, du volt, du microfarad, et ainsi de suite; mais il y a deux ou trois points sur lesquels je voudrais faire quelques remarques, et l'un deux se rapporte aux limites d'application du système dit *pratique*. Le système absolu est parfaitement coordonné du commencement à la fin, suivant le développement des conditions initiales; l'une d'elles, dans le système électromagnétique, est que la force électromotrice produite par le déplacement d'un conducteur de longueur égale à l'unité, avec l'unité de vitesse, perpendiculairement aux lignes de force d'un champ d'intensité égale à l'unité, est égale à l'unité. C'est celle-là qu'il faut développer si l'on veut rendre le système complet et coordonné, et les dimensions de tous les instruments et appareils devront être évalués uniformément en fonction de l'unité de longueur adoptée dans la définition absolue. L'ohm vaut mille millions de centimètres ou 10000^{km} par seconde. Si vous voulez faire de l'ohm une unité absolue électromagnétique en prenant la seconde comme unité de temps, vous devez prendre le quadrant terrestre comme unité de longueur. Si vous vous conformez partout à cette prescription, vous n'aurez jamais besoin d'abandonner ce système, ni de recourir en quoi que ce soit au système C.G.S.: vous aurez le système Q.G.S., purement et simplement. Mais il serait évidemment incommode de mesurer les dimensions des instruments, les diamètres des roues et les calibres des fils, en sous-multiples du quadrant terrestre. Imaginez l'effarement d'un ouvrier qui s'entendrait dire par une personne adonnée à la Science : « Donnez-moi un fil de $\frac{1}{100\,000}$ de quadrant terrestre de longueur, et de $\frac{1}{10\,000\,000\,000}$ de diamètre. » Maintenant, en quoi le système dit *pratique* diffère-t-il du système absolu, et pourquoi ne peut-il être aussi logique et aussi complet que le système absolu? Nous n'abandonnerions jamais le système absolu, s'il nous donnait dans tous les cas des nombres commodes; et il nous donne des

nombres commodes pour la mesure d'un courant, l'unité étant égale à 10 fois l' « ampère » du système pratique. L'unité C.G.S. de résistance, toutefois, est trop faible, ainsi que l'unité de force électromotrice. Pour avoir des nombres commodes, nous donnons des noms à certains multiples des unités, voilà tout; et nous nous servons de ces multiples juste aussi longtemps qu'ils sont commodes, et pas plus longtemps. Voilà mon opinion sur le système pratique : servez-vous-en pour plus de commodité, tant qu'il est commode; au moment où il cesse de l'être, jetez-le par-dessus bord et prenez le système C.G.S. purement et simplement. Le Congrès de Paris a décidé d'adopter comme unités pratiques les unités qui sont maintenant si connues, l'ohm, le volt de l'Association Britanique, et l'ampère que j'ai proposé moi-même. Le coulomb fut aussi ajouté, et l'on eut grandement raison d'admettre le nom de Coulomb, un des pères de la Science électrique. Le watt fut alors ajouté par Sir W. Siemens; il a été généralement adopté, et s'est montré très commode. Mais si vous voulez pousser plus loin le système pratique et considérer quelque chose qui comprenne un pôle magnétique ou un champ magnétique, vous vous trouvez plongés dans l'embarras par l'adoption du quadrant terrestre comme unité de longueur; il n'est plus commode de s'écarter du système C.G.S. Retournez alors au système C.G.S. pur et simple.

J'ai parlé de la résistance d'un ohm comme étant mesurée par une vitesse. J'aimerais à expliquer cela en peu de mots. Imaginez un moulin à écureuil dont l'axe soit placé verticalement. Mettez une paire de balais au haut et au bas des barreaux; placez les balais dans le plan parallèle au méridien magnétique et passant par l'axe, et faites tourner le moulin à telle vitesse que vous voudrez. Prenez un galvanomètre semblable à une boussole des tangentes, mais n'ayant qu'un arc de fil de longueur égale au rayon (un arc sous-tendant un angle de 57°,3 environ), dont les deux extrémités seraient dans un même plan horizontal, soit au-dessus, soit au-dessous de l'aiguille, et des électrodes perpendiculaires au plan de l'axe et reliées aux balais. Le moulin à écureuil doit être

placé assez loin du galvanomètre pour ne pas l'influencer sensiblement par la force électromagnétique qu'il développe. Faites maintenant tourner le moulin à écureuil; que la longueur de chacun de ses barreaux soit de un centimètre; mais ce serait un moulin à puces, plutôt qu'un moulin à écureuil; supposez donc que chaque barreau ait 100 centimètres de long; faites tourner le moulin à écureuil assez vite pour que votre galvanomètre soit dévié de 45°. Alors la vitesse des barreaux sera égale à la résistance du circuit évaluée en mètres par seconde. Une résistance double exige une vitesse double; une résistance moitié moindre exige une vitesse moitié moindre, pour que la déviation ait toujours la valeur prescrite, 45°. Voilà la raison physique de ce fait, que 10000^{km} par seconde, ou 1000000000 centimètres par seconde, servent de mesure à la résistance. Tandis que nous mesurons ainsi la résistance par une vitesse en mesure électromagnétique, nous mesurons la conductibilité par une vitesse en Électrostatique. J'ai aussi donné une très simple explication de ce fait dans un énoncé cité par Sir William Siemens dans son discours présidentiel à l'Association Britannique, à Southampton, en 1882. La vitesse avec laquelle la surface d'une sphère doit se contracter autour du centre pour que son potentiel reste constant, quand on la relie à la Terre au moyen d'un fil mouillé, mesure le pouvoir conducteur de ce fil mouillé. Un pouvoir conducteur double exigera une vitesse de retrait double, c'est-à-dire que la sphère devra se contracter deux fois plus vite pour ne pas perdre son potentiel. Avec un fil très long et à moitié sec, la contraction serait très lente. Supposez que nous ayons, pour une expérience électrique, un globe isolé dans l'air de cette salle, et relié au sol par un fil de soie. Si vous suivez au moyen d'un électromètre les valeurs du potentiel, vous le verrez baisser graduellement. Vous pourriez imaginer que les poussières de l'air emportent l'électricité, mais en réalité la déperdition se fait seulement par ce fil de soie à demi sec. Quand vous voyez baisser le potentiel, imaginez que vous voyiez le globe se contracter lentement de manière à conserver son potentiel constant, en même temps qu'il perd graduellement et petit à petit sa charge électrique : la rapidité avec laquelle la surface doit

se retirer vers le centre pour que le potentiel reste constant mesure le pouvoir conducteur du fil de soie en mesure électrostatique. Nous voyons ainsi comment c'est une vitesse qui mesure en unités électrostatiques le pouvoir conducteur d'un fil, métallique ou non métallique. Mais, comme nous l'avons vu, la résistance du même fil est mesurée, en mesure électromagnétique, par une autre vitesse. La mystérieuse quantité v est la racine carrée du produit de ces deux vitesses. Ou encore, c'est la vitesse qui mesure à la fois, en mesure électromagnétique, la résistance et, en mesure électrostatique, la conductibilité d'un seul et même conducteur; ce conducteur doit avoir une résistance d'environ 30^{ohms}, parce que l'expérience a montré que v ne diffère pas beaucoup de $300\,000^{\text{km}}$ par seconde.

Je vous ai dit combien nous devons à Sir Charles Bright et à M. Latimer Clark pour avoir proposé des noms. Le meilleur moyen de comprendre ce que nous devons à la possession des noms, est de voir ce que nous perdons, dans quel fâcheux embarras nous nous trouvons, dans les cas où les noms nous manquent. Nous avons besoin d'un nom pour l'inverse de la résistance. Nous avons « conductibilité », mais nous n'avons pas de nom pour l'unité de conductibilité. J'ai fait, il y a trente ans, pour la mesure des conductibilités, une boîte de bobines de résistances, et j'en ai fait une autre il y a quinze ans; toutes deux sont délaissées grâce à cette absence de nom. Mes propres élèves continueront d'employer la boîte de résistances en ohms de préférence à la boîte de conductibilités, parce qu'en employant cette dernière il est très gênant de dire : « La résistance est l'inverse de la somme des inverses de ces résistances. » C'est la conductibilité que l'on a besoin de mesurer, mais l'idée est trop embarrassante; et cependant, dans certains cas, le système des conductibilités est infiniment supérieur en exactitude et en commodité à celui qu'on obtient en ajoutant des résistances en série. Pour nommer l'inverse d'un ohm, dans la mesure du pouvoir résistant, pour nommer l'unité de conductibilité qui correspondra à l'ohm, on propose de prendre un phonographe et de le tourner en sens inverse; vous voyez ce qu'il fera du mot *ohm;* j'admire la

proposition et je souhaite que quelqu'un prenne la responsabilité de l'adopter; les boîtes de bobines en *mhos* deviendraient alors de suite d'un usage général. En ce qui concerne la lumière électrique, qu'avons-nous à mesurer avec le galvanomètre d'intensité? Nous avons un galvanomètre de potentiel et un galvanomètre d'intensité ([1]). Tout le monde sait ce que nous voulons mesurer avec le galvanomètre de potentiel. Le domestique, dans chaque maison éclairée par l'électricité, connaît à peu près les potentiels; si, en lisant le galvanomètre, il voit que le potentiel est inférieur à 80^{volts}, il sait que quelque chose va mal; il ira tout de suite à la chambre de la machine et fera monter le potentiel à 84^{volts}, en supposant, par exemple (ce qui est le cas dans ma propre maison, en attendant que je puisse avoir des lampes de 200^{volts}), que le potentiel convenable soit de 84^{volts}. Dans le galvanomètre d'intensité, il y a des divisions indiquant le nombre d'ampères du courant, c'est possible. Mais après tout, qu'avons-nous besoin de connaître, outre le potentiel? La somme des inverses des résistances placées dans le circuit. Dans le système en arc multiple, chaque lampe nouvellement allumée ajoute une conductibilité. Combien il serait commode, en plaçant une lampe (ajoutant une certaine conductibilité) dans un circuit comprenant des lampes Edison ou Swan de 100^{volts} dans chacune desquelles circule un courant de $0^{\text{amp}},7$ et qui ont, par conséquent, une résistance de 143^{ohms}, combien il serait commode de pouvoir dire que vous ajoutez un *mho*, ou une fraction de *mho*, suivant le cas. Je ne dis pas que *mho* est le terme à employer, mais je souhaite qu'il puisse être adopté de manière qu'il entre de suite dans l'usage courant. Nous aurons le mot quand nous aurons la chose : je devrais plutôt dire, nous aurons la chose quand nous aurons le mot. L'Appendice au Rapport publié en 1862 par le premier Comité de l'Association Britannique pour les mesures électriques, contient la description d'un « mesureur de résistances » inventé par Sir W. Siemens ([2]), et d'une « modification du mesureur

---

([1]) Voltmètre et ampèremètre. P. L.

([2]) Une aiguille est placée entre deux bobines identiques et à égale distance

de résistances de Siemens » par le professeur Fleeming Jenkin. Cet instrument donne directement la résistance d'un conducteur, au moyen d'une disposition qui, dans chaque observation, ramène une aiguille aimantée à une position de zéro. Dans l'appareil original de Siemens, la disposition consiste dans le déplacement de deux bobines par un mouvement de translation, et la conductibilité est lue sur une échelle divisée en parties égales et disposée, grâce à une courbe déterminée par l'expérience, de manière à donner une lecture de la résistance cherchée. Dans la modification de Jenkin, la disposition mécanique est beaucoup simplifiée par l'adoption d'une combinaison électromagnétique différente, et la résistance cherchée est donnée par la tangente de l'angle dont il faut faire tourner les bobines pour ramener l'aiguille au zéro. On construit facilement un instrument analogue, donnant la résistance par une simple lecture, sans qu'il soit besoin d'effectuer aucun arrangement ou « réglage » dans chaque observation. J'ai construit un tel instrument en 1858; c'est simplement un galvanomètre avec des bobines de résistances directrices au lieu d'un aimant directeur ([1]). Cet instrument donne de suite la conductibilité, et si vous désirez donner un nom à l'unité de conductibilité (supposez que vous ayez adopté *mho*), vous pourrez l'appeler un *mhomètre*. La règle, pour les résistances en série, serait que la somme des inverses des nombres de mhos est égale au nombre d'ohms; et pour les conductibilités en arcs parallèles, la somme des inverses des nombres d'ohms est égale au nombre de mhos. Le nombre de mhos, ou de millimhos, mesurera alors le nombre des lampes placées dans le circuit. Ainsi, le galvanomètre d'éclairage, ou le compteur d'éclairage, pourrait avoir une échelle divisée en centimhos ou en millimhos; ou

---

des deux; les bobines étant parcourues en sens inverse par le même courant, l'aiguille est au zéro. Si l'on intercale une résistance sur le circuit d'une des bobines, l'aiguille dévie. On la ramène au zéro en déplaçant la seconde bobine; l'appareil peut être aisément gradué en ohms. C'est là la disposition du micro-ohms mètre de Maiche, simplification de l'appareil de Siemens. P. L.

([1]) L'instrument est représenté dans la *fig.* 6 de mon brevet, n° 329, de 1858, *Improvements in Testing and Working Electric Telegraphs*.

bien, il pourrait être gradué de telle façon que le nombre lu sur son échelle à un moment quelconque fût simplement le nombre des lampes allumées à ce moment [1]. L'instrument aura ainsi l'avantage d'être constant, malgré les variations de la machine. Un instrument de potentiels, placé sur un circuit de lumière électrique dans les meilleures conditions de marche, est toujours quelque peu variable, parce que le potentiel varie d'une bonne quantité, de 1 ou 2 pour 100 peut-être; mais la résistance dans les lampes varie excessivement peu. Le mhomètre sera, dans ces conditions, un instrument absolument stable. Vous ne le verrez pas trembler, même si la machine est irrégulière. Le galvanomètre de potentiel vous montrera la grandeur des variations dont vous aurez à vous plaindre ou qu'il faudra corriger.

J'arrive enfin aux desiderata relatifs à l'usage de ce grand système d'unités. Il ne peut rien y avoir de beaucoup plus satisfaisant que la mesure d'une résistance un peu grande, comme nous la faisons habituellement aujourd'hui; mais s'il nous faut une méthode meilleure pour les faibles résistances, les boîtes de conductibilités en mhos que j'ai indiquées nous rendront de grands services. Ce dont nous avons grand besoin aujourd'hui pour les mesures pratiques, c'est un étalon de force électromotrice. C'était le but principal d'un Comité de l'Association Britannique de formation récente, mais il n'a pas été encore atteint d'une manière satisfaisante pour les besoins de la pratique. Les couples étalons remplissent le but jusqu'à un certain point, mais il nous faut quelque chose de mieux, quelque chose comme un électro-dynamomètre, qui donne une mesure idiostatique de potentiel bien constante, permettant de déterminer facilement et exactement la constante d'un électromètre ou d'un galvanomètre ordinaires quelconques.

---

(1) [Note du 8 décembre 1887. — Un modèle de boussole des tangentes magnétostatique, que j'ai récemment publié pour la pratique, sert au même objet. Sa construction est plus simple et sa forme plus commode que celles du mhomètre dont il est question dans le texte (W. T.)].

On trouvera dans le Journal *la Lumière électrique* et dans l'*Annuaire de l'électricien* la description des instruments auxquels il est fait allusion ici, ainsi que d'autres plus récents. M. B. P. L.



Il y a là matière à recherches; on peut résoudre le problème de bien des manières, et j'espère, avant qu'une autre année ne soit écoulée, le voir résolu de plusieurs façons, d'une au moins à coup sûr.

En ce qui touche la Science électrique, le grand besoin du moment, au point de vue des mesures, est une évaluation exacte de v, le rapport entre les unités électrostatiques et les unités électromagnétiques, et j'espère que ceux qui s'occupent de recherches scientifiques vont reprendre cette question, et lui donner une solution aussi exacte que celle qu'a donnée Lord Rayleigh pour la mesure de l'ohm.

Il reste à examiner un point très intéressant : c'est le travail de Joule dont il a été rendu compte par le Comité de l'Association Britannique (*voir* le Volume des *Rapports sur les étalons de mesures électriques*, Spon, 1871, p. 138). C'est seulement pour la préparation de cette conférence que je l'ai examiné sérieusement, et que j'en ai rassemblé méthodiquement les chiffres. Joule, avec la modestie qui caractérise l'homme, et la prodigieuse exactitude qui caractérise son œuvre, a fait, à la prière de l'Association Britannique, des recherches sur l'échauffement produit par un courant évalué en mesure définie, en prenant comme unité de résistance l'ohm de l'Association Britannique, que l'on croyait alors égal à 10^9 unités C.G.S. de résistance; et il considérait lui-même la mesure électrique exécutée à ce moment comme plus exacte que ne pouvaient l'être ses anciennes déterminations de l'équivalent mécanique de l'unité thermique au moyen du frottement. Le résultat obtenu, en supposant l'ohm de l'Association Britannique absolument correct, donne pour l'équivalent mécanique 429 kilogrammètres au lieu de 423,5, nombre trouvé auparavant; et Joule manifesta lui-même l'intention de faire une nouvelle détermination par la méthode du frottement. Plaçons-nous maintenant dans la situation où l'on se trouvait en 1867, en présence de ces deux déterminations rivales de l'ohm : l'une obtenue par la méthode du cadre tournant de l'Association Britannique, et l'autre par la méthode électrothermique de Joule, en prenant, comme équivalent dynamique de l'unité de chaleur, le nombre donné par la méthode du frotte-

ment. Supposons que cette méthode électrothermique ait été exactement appliquée; ce que nous devrons en conclure, ce n'est pas que le résultat donne l'équivalent mécanique, mais bien que l'unité de l'Association Britannique n'était pas 10^9 comme on le croyait, mais $10^9 \times 0,98697$. Ainsi, cette expérience était, de fait, une détermination par Joule de la résistance de l'ohm de l'Association Britannique en mesure absolue. La détermination de Lord Rayleigh a conduit à $10^9 \times 0,98677$; la différence est de deux unités du quatrième ordre, ou d'environ $\frac{1}{5000}$. L'exactitude du travail de Joule est merveilleuse : ce n'est donc pas une coïncidence fortuite. Je pense qu'après les travaux de Joule, Lord Rayleigh, Mrs Sidgwick et autres, nous ne pouvons plus conserver aucun doute sur la valeur absolue de l'unité Siemens, ou de l'unité de l'Association Britannique. J'engage tout le monde à prendre pour unité l'ohm de Lord Rayleigh, à la place de celui de l'Association Britannique. J'ai commencé à le faire, et je marque toutes mes mesures R.O. Vous pouvez faire toutes les vôtres en unités de l'Association Britannique, mais réduisez, je vous prie, en ohms de Lord Rayleigh, au moyen du coefficient de réduction 0,98677. Les volts doivent être réduits dans le même rapport. L'ancienne évaluation que j'ai faite en 1851, d'après l'expérience de Joule, de la force électromotrice absolue d'un couple étalon Daniell, m'a donné 1,07 volts; et après avoir cru pendant 10 ans, grâce à l'unité de l'Association Britannique, que cette force électromotrice était de 1,078, nous la corrigeons de nouveau et trouvons 1,07. De même pour le volt. Mais il nous faut, pour les autres éléments des mesures électriques, spécialement pour la force électromotrice et la capacité soit électrostatique, soit électromagnétique et pour le nombre de comparaison v, des instruments et des procédés bien plus exacts. Voilà les points sur lesquels doivent porter les progrès et les perfectionnements qui donneront un caractère suffisamment scientifique à cet important système de mesures absolues, dont j'ai essayé de vous retracer et de vous expliquer l'origine.

III.

LE DÉMON DISTRIBUTEUR DE MAXWELL.

RÉSUMÉ D'UNE CONFERENCE DU VENDREDI SOIR DEVANT L'INSTITUTION ROYALE DE LA GRANDE-BRETAGNE, 28 FÉVRIER 1879. (*Proc. Roy. Inst.*, t. IX, p. 113.)

Le mot « démon », qui originairement signifiait en grec : être surnaturel, n'a jamais été correctement employé pour désigner une personnification réelle ou idéale de la méchanceté.

Le « démon » de Clerk Maxwell est une créature d'imagination ayant certains moyens d'action parfaitement bien définis, et d'un caractère purement mécanique, inventé pour nous aider à comprendre la « dissipation de l'énergie » dans la nature.

C'est un être qui n'a pas de qualités surnaturelles, et ne diffère des animaux réels et vivants que par une petitesse et une agilité extrêmes. Il peut à volonté arrêter, frapper, pousser, tirer individuellement chaque atome de matière et modérer ainsi le cours naturel de son mouvement. Idéalement doué de bras, de mains et de doigts (deux mains et dix doigts lui suffisent), il peut agir sur les atomes comme un pianiste sur les touches du piano; son action est même un peu plus étendue, il peut pousser ou tirer chaque atome *dans une direction quelconque*.

Il ne peut ni créer, ni annuler de l'énergie; mais exactement comme le fait un animal vivant, il peut mettre en réserve des quantités limitées d'énergie, et les faire réapparaître à son gré. En opérant par sélection sur les atomes individuels, il peut renverser la dissipation naturelle de l'énergie, il peut échauffer jusqu'à l'incandescence une moitié d'un vase clos rempli d'air ou d'une barre de fer, et refroidir l'autre moitié

à la température de la glace; il peut régler l'énergie du mouvement des molécules d'un vase d'eau de manière à élever l'eau à une certaine hauteur et à la refroidir proportionnellement (1° C. pour une ascension de 423^m,5); il peut « distribuer » les molécules dans une dissolution de sel ou dans un mélange de deux gaz, de manière à renverser la marche naturelle de la diffusion, et à produire la concentration de la dissolution dans une portion de la masse, laissant de l'eau pure dans le reste; ou, dans l'autre cas, séparant les gaz dans deux parties différentes du vase qui les contient.

La « dissipation de l'énergie » dans la nature, résulte de la réunion fortuite des atomes. L'énergie motrice [1] perdue ne peut être restituée essentiellement que par une action s'exerçant sur les atomes individuellement; et le mode d'action qui conduit à la restauration de l'énergie motrice est essentiellement une répartition progressive qui envoie dans une direction tous les atomes d'une espèce ou d'une classe, dans une autre tous ceux d'une autre espèce ou d'une autre classe.

La loi suivant laquelle le démon idéal les distribue peut se rapporter au caractère essentiel de l'atome; par exemple, tous les atomes d'hydrogène doivent être envoyés à gauche ou arrêtés lorsque, se dirigeant vers la droite, ils traversent une surface limite idéale; cette loi peut encore se rapporter à la vitesse que chaque atome se trouve avoir quand il approche de la limite : si cette vitesse est supérieure à une certaine valeur déterminée, l'atome devra aller à droite; si elle est moindre, à gauche. Cette dernière loi de distribution, mise à exécution par le démon, détruit l'équilibre de température et s'oppose à la diffusion naturelle de la chaleur; la première s'oppose à la diffusion naturelle de la matière.

Par la combinaison des deux procédés, le démon peut décomposer l'eau ou l'acide carbonique, d'abord en portant une portion du composé à la température de dissociation (c'est-

(1) Dans le texte, *motivity*, c'est-à-dire exactement : pouvoir de produire du mouvement; *énergie motrice* nous a semblé être la traduction la plus correcte de ce terme, que l'auteur explique un peu plus loin par les mots *energy for motive power*. P. L.



à-dire une température assez élevée pour que les collisions fassent éclater les molécules en atomes), et envoyant alors les atomes d'oxygène d'un côté et les atomes d'hydrogène ou de carbone de l'autre; ou bien il peut effectuer la décomposition en luttant contre l'affinité chimique comme il suit : qu'il emprunte une petite provision d'énergie à la résistance au rapprochement mutuel de deux molécules composées, en les maintenant pour ainsi dire pressées sur ses deux mains, et accumulant de l'énergie comme dans un ressort tendu; qu'il applique ensuite ses deux mains entre l'oxygène et l'hydrogène (double en volume) qui constituent une molécule composée de vapeur d'eau, et les sépare violemment. Il peut répéter cette opération jusqu'à ce qu'une fraction considérable du nombre total de molécules composées, comprises dans une quantité donnée de vapeur d'eau placée dans un vase fermé, soient séparées en oxygène et hydrogène aux dépens de l'énergie empruntée aux mouvements de translation. L'énergie motrice (ou énergie produisant la puissance motrice) ainsi obtenue et résidant d'un côté dans le mélange explosif d'oxygène et d'hydrogène, et de l'autre côté dans des corps capables de se brûler mutuellement, le carbone et l'oxygène, est une transformation de l'énergie contenue en substance dans la forme d'énergie cinétique constituée par les mouvements thermiques des molécules composées. La décomposition de l'acide carbonique et de l'eau qui accompagne le développement naturel des plantes est tout à fait différente; l'énergie motrice qui en résulte est empruntée aux ondulations de la lumière ou de la chaleur rayonnante, émanée de la matière extrêmement chaude du Soleil.

La conception du « démon distributeur » est simplement mécanique et a une grande importance dans la science physique pure. Il n'a pas été imaginé pour nous servir dans l'étude des questions se rapportant à l'influence de la vie et de l'esprit sur les mouvements de la matière, questions qui par leur nature dépassent les limites de la Dynamique simple.

La Conférence était illustrée par une série d'expériences.

IV.

L'ÉLASTICITÉ

ENVISAGÉE

COMME POUVANT ÊTRE UN MODE DE MOUVEMENT.

RÉSUMÉ D'UNE CONFÉRENCE DU VENDREDI SOIR DEVANT L'INSTITUTION ROYALE DE LA GRANDE-BRETAGNE, 4 MARS 1881. (*Proc. Roy. Inst.*, t. IX, p. 520.)

Au sujet du titre de cette Conférence, l'orateur s'exprima ainsi : « Le titre seul du beau livre du Dr Tyndall, *La Chaleur, mode de mouvement*, est l'enseignement d'une vérité, et a répandu de tous côtés à travers le monde une des plus grandes découvertes de la Philosophie moderne. Je l'ai toujours admiré : je l'ai longtemps convoité pour l'élasticité; et, avec la bienveillante autorisation de son auteur, je l'ai emprunté pour la Conférence de ce soir.

» Il y a un siècle et demi, Daniel Bernoulli ébaucha la théorie cinétique de l'élasticité des gaz, qui a été acceptée comme vraie par Joule, et magnifiquement développée par Clausius et Maxwell; elle a été conduite depuis le calcul des mouvements d'un grand nombre d'atomes jusqu'à l'observation et à la mesure du libre parcours d'un seul, dans l'explication donnée par Dewar et Tait du radiomètre, cette grande découverte de Crookes, et dans la réalisation éclatante des anciens torrents de Lucrèce (1), par laquelle Crookes a lui-

---

(1) Allusion aux expériences de M. Crookes sur la matière radiante. Lucrèce, on le sait, admet que les atomes tombent perpétuellement dans le vide; à des époques et en des points indéterminés, ils s'écartent un peu de la verticale; il

même développé leur explication de ses premières expériences; grâce à cette théorie, nous savons, moins de deux cents ans après la première découverte, par Robert Boyle, de la *force élastique de l'air,* que cette force est une simple résultante moyenne de myriades de collisions moléculaires.

» Mais les molécules et les atomes doivent être doués d'élasticité, et *cette* élasticité doit être expliquée par le mouvement avant que l'opinion exprimée avec quelque hésitation dans le titre de cette conférence, *L'Élasticité envisagée comme pouvant être un mode de mouvement*, puisse acquérir la glorieuse certitude de *La Chaleur, mode de mouvement* ».

L'orateur a cité les toupies, le cerceau roulant des enfants, et le bicycle à une allure rapide, comme des cas de stabilité et de raideur élastiques en quelque sorte, dues au mouvement, et il a fait avec des girostats des expériences dans lesquelles les appareils conservaient avec une stabilité, une résistance et une élasticité comparables à celles que pourraient donner des liens d'acier, des positions verticales tout à fait instables sans rotation. Une chaîne sans fin flexible paraissait rigide quand on la faisait rapidement tourner sur une poulie; et lorsqu'on la faisait sauter hors de la poulie et qu'on la laissait tomber à terre, elle se tenait droite et raide pendant un certain temps, jusqu'à ce que le contact et le frottement des chaînons contre le sol eussent détruit son mouvement. Un disque de caoutchouc mou qu'on faisait tourner rapidement semblait acquérir la raideur du bord d'un gigantesque chapeau à la Rubens. Une petite balle de bois, qui, lorsqu'on la précipitait dans de l'eau tranquille, remontait très vite, restait au fond, comme si elle eût été emprisonnée dans de la gelée, lorsque l'eau recevait un rapide mouvement de rotation; cette balle reculait vivement comme si l'eau avait eu une élasticité semblable à celle de la gelée, lorsqu'on la frappait en enfonçant un fil métallique rigide au travers du centre du bouchon fermant le vase de verre plein d'eau.

---

en résulte des chocs qui dévient les atomes et permettent les rencontres; les atomes flottent au hasard (*volitant*) dans le vide, où ils sont animés de mouvements dont la vitesse est très grande. P. L.

Enfin, de grands anneaux de fumée, dégagés d'une ouverture elliptique ou circulaire percée dans une boîte, étaient rendus visibles par la lumière électrique, dans leur marche à travers l'air de l'amphithéâtre. Chaque anneau était circulaire, et son mouvement était régulier lorsque l'ouverture de laquelle il sortait était circulaire, et qu'il n'était pas dérangé par un autre anneau. Si un anneau était envoyé obliquement après un autre, la collision ou l'approche de la collision les renvoyait tous deux dans des directions très différentes de leurs directions initiales, chacun d'eux paraissant vibrer comme une bande de caoutchouc. Si l'ouverture était elliptique, les anneaux soustraits à toute perturbation étaient animés dès le début de vibrations régulières qui se continuaient dans tout le cours de leur pérégrination à travers la salle de conférences. Donc il se développait là, dans l'eau et dans l'air, en vertu du mouvement seul, une élasticité comparable à celle d'un solide élastique. Ne pourrait-on expliquer ainsi l'élasticité des derniers atomes de matière? Mais cette théorie cinétique de la matière est un rêve, et ne pourra être rien autre, tant qu'elle ne pourra pas expliquer l'affinité chimique, l'électricité, le magnétisme, la gravitation et l'inertie des masses (c'est-à-dire, des multitudes de tourbillons).

La théorie de Le Sage pourrait donner une explication de la gravité et de ses relations avec l'*inertie des masses,* d'après la théorie des tourbillons, n'étaient l'hétérotropie essentielle des cristaux, et l'isotropie, en apparence parfaite de la gravité. Jusqu'à présent, on n'a découvert aucun fait capable d'indiquer la voie qui pourrait peut-être conduire à vaincre la difficulté ou à la tourner, et on n'a pas imaginé comment on pourrait en découvrir. La croyance qu'aucune autre théorie de la matière n'est possible est la seule chose qui puisse faire pressentir qu'il est réservé au monde de voir un autre beau livre intitulé l'*Élasticité, mode de mouvement.*

V.

LA GRANDEUR DES ATOMES.

CONFÉRENCE DU VENDREDI SOIR, FAITE DEVANT L'INSTITUTION ROYALE DE LA GRANDE-BRETAGNE, LE 3 FÉVRIER 1883. (*Proc. Roy. Inst.*, t. X, p. 185.)

On peut concevoir et mesurer la grandeur des atomes. — Évaluation fondée sur les phénomènes de l'électricité de contact. — Attraction capillaire; limite inférieure de l'épaisseur d'une membrane d'eau de savon. — Théorie de la lumière; épaisseur des couches d'oxyde qui se forment sur les métaux chauffés; transparence des métaux réduits en lames très minces; dispersion de la lumière; discontinuité de la matière; nombre d'atomes compris dans la longueur d'onde; direction des vibrations dans la lumière polarisée; phosphorescence et fluorescence. — La théorie cinétique des gaz et la grandeur des atomes.

Quatre modes de raisonnement appuyés sur l'observation ont conduit à cette conclusion, que le degré de ténuité des atomes n'est ni inconcevable, ni immesurable. C'est à dessein que j'emploie les mots « inconcevable » et « immesurable ». Ce qui est mesurable n'est pas inconcevable; ces deux mots rapprochés l'un de l'autre forment donc une tautologie. Nous laissons l'inconcevable aux métaphysiciens. Rien de ce que nous pouvons mesurer en Physique n'est inconcevablement grand ou inconcevablement petit. Il peut être difficile de se représenter les nombres qui en expriment les dimensions; mais que l'objet considéré soit très grand ou très petit, il n'y a pour nous rien d'inconcevable dans sa nature, du fait de sa grandeur ou de sa petitesse, et pas davantage dans l'idée que nous nous formons de ces dimensions, dans leur appréciation et dans leur expression numérique. Les résultats généraux auxquels conduisent les quatre modes de raisonnement dont j'ai parlé, et qui sont fondés respectivement sur la théorie ondulatoire de

la lumière, sur les phénomènes de l'électricité de contact, sur l'attraction capillaire et sur la théorie cinétique des gaz, s'accordent à montrer que le diamètre des atomes ou des molécules de la matière, dans les conditions ordinaires, doit être voisin de $\frac{1}{10\,000\,000}$ de centimètre, ou compris entre $\frac{1}{10\,000\,000}$ et $\frac{1}{100\,000\,000}$ de centimètre. C'est à dessein que je m'exprime d'une manière un peu vague, quand je parle des atomes et des molécules. Je prie les chimistes de m'excuser, si même parfois j'emploie improprement les mots et commets des erreurs de noms. Les chimistes ignorent ce que peut être l'atome; par exemple, ils ne savent pas si le gaz hydrogène est composé de molécules formées par l'union de deux portions de matière, et toujours en mouvement; ou s'il est composé de molécules simples, toutes indivisibles, ou au moins incapables d'être scindées par les actions chimiques. Je n'approfondirai aucune de ces questions; je me contenterai de cette idée générale, que la matière, bien qu'on puisse la concevoir comme divisible à l'infini, n'est pas divisible à l'infini sans décomposition. Ainsi, un édifice en briques peut être divisé en parties; une partie contiendra 1000 briques, et une autre 2500 par exemple; ces parties, prises dans leur ensemble, peuvent être considérées comme semblables ou homogènes; mais si vous divisez la matière d'un édifice en briques en fragments de 30 centimètres d'épaisseur, et si vous imaginez qu'on pousse plus loin la division, vous arriverez à quelque chose qui est atomique, c'est-à-dire ne peut être divisé davantage sans que les éléments de sa structure ne soient détruits. La question de la structure moléculaire d'un édifice n'implique pas nécessairement les suivantes : Une brique peut-elle être divisée en parties? Et ces parties peuvent-elles être divisées en parties beaucoup plus petites? et ainsi de suite. C'était une coutume, dans la scolastique, de prendre comme thème favori de l'argumentation métaphysique la question de savoir si la matière est divisible à l'infini, ou si l'*espace* est divisible à l'infini, ce que soutenaient quelques-uns; tandis que d'autres soutenaient que la *matière* seule n'est pas divisible à l'infini, et démontraient qu'il n'y a rien d'inconcevable dans une division à l'infini de l'espace. Le temps lui-même était divisé en

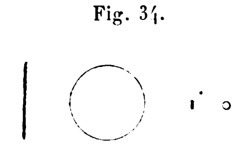
moments (atomes de temps!); l'idée de la continuité du temps était enveloppée d'un chaos d'arguments et d'un fatras, je ne dirai pas d'absurdités, mais de subtilités métaphysiques, ce qui sans doute était très amusant, faute d'un sujet d'étude plus instructif. Voici cependant un point extrêmement important, et digne de la plus sérieuse attention; en Chronométrie, comme en Géométrie, il y a une continuité absolue, et c'est tout simplement une inconcevable absurdité, que d'attribuer une limite à la petitesse soit du temps, soit de l'espace. Mais d'un autre côté, se demander si l'on peut diviser un morceau de verre en fragments d'un diamètre inférieur à $\frac{1}{1000000}$ de centimètre et continuer la division indéfiniment, sans le détruire et lui faire perdre les propriétés du verre, de même qu'une brique n'a pas la propriété d'un mur de briques, c'est se poser une question très pratique, et une question que nous sommes tout à fait disposé à aborder.

Je désire vous prier, dès le début, de ne pas vous écarter du sujet en imaginant que les atomes sont d'une ténuité excessive. Les atomes, après tout, ne sont pas si extraordinairement petits. Les quatre modes de raisonnement dont j'ai parlé montrent, d'une manière parfaitement certaine, que le diamètre des molécules constitutives de l'air que nous respirons n'est pas de beaucoup inférieur à $\frac{1}{10000000}$ de centimètre, si même il descend jusque-là. Regardez ce dessin (*fig.* 34), car il est nécessaire que vous vous représentiez tous la grandeur du centimètre, du millimètre, du dixième, du centième, du millième et du dix-millième de millimètre. Le dessin accroché au mur représente le mètre; à côté, vous voyez le décimètre, et un cercle de 1 décimètre de diamètre; le centimètre et un cercle de 1 centimètre de diamètre; enfin le millimètre, qui vaut un dixième de centimètre, et un cercle de 1 millimètre de diamètre. (Pour plus de commodité, la *fig.* 34, qui représente le dessin en question, montre seulement les dimensions relatives du centimètre et du millimètre). Voici donc, sur ce dessin, le mètre, le centimètre, le millimètre, avec des cercles de même diamètre. Quelqu'un me dit que le millimètre n'y est pas. Je ne puis le voir en effet, mais il y est certainement et avec lui un cercle dont le diamètre

est 1 millimètre, tous deux peints avec soin en noir. Je dis qu'il y a là 1 millimètre et vous ne pouvez pas le voir. Eh bien, imaginez maintenant qu'*il y a là* $\frac{1}{10}$ de millimètre, et qu'*il y a* $\frac{1}{100}$ de millimètre, et qu'*il y a* $\frac{1}{1000}$ de millimètre, et qu'*il y a* un atome rond d'oxygène de $\frac{1}{10000000}$ de millimètre de diamètre. Vous voyez tout cela.

Il faut maintenant que nous ayons un procédé pratique pour mesurer les millièmes de millimètre, et c'est l'Optique qui nous le fournit. Un de nos étalons temporaires de mesure sera la longueur d'onde de la lumière. Mais la longueur d'onde est une mesure très mal définie, parce qu'il y a, pour les

Fig. 34.



lumières de couleurs différentes, pour les radiations visibles et les radiations invisibles, des longueurs d'onde qui diffèrent dans le rapport de 1 à 16. Nous connaissons, pour ainsi dire (en empruntant une comparaison à l'Acoustique), quatre octaves de lumière. Jusqu'où s'étend en réalité la série, au-dessus et au-dessous de la partie mesurée jusqu'à présent? Nous ne pouvons pas même le conjecturer dans l'état actuel de la Science. Le Tableau placé devant vous (Table I) vous donne une idée des grandeurs de ces longueurs d'onde, et vous fait aussi concevoir des intervalles de temps très petits. Dans la colonne de gauche vous voyez les longueurs d'onde de la lumière en fractions de centimètre; l'unité en fonction de laquelle ces nombres sont mesurés est le $\frac{1}{100000}$ (ou 10^{-5}) de 1 centimètre. Nous avons donc, pour la lumière visible, des longueurs d'onde comprises entre 7,5 et près de 4, ou 3,9. On peut donc dire, en nombres ronds, que les longueurs d'onde de la lumière visible, qui sont seules indiquées dans cette Table, vont de 4 à 8, sur notre échelle de cent-millièmes de centimètre. La longueur d'onde 8 appartient à une

radiation invisible située un peu au-dessous [1] du rouge extrême du spectre. La plus basse de ces radiations, que Fraunhofer a désignée par la lettre A, a pour longueur d'onde 7,5 cent-millièmes de centimètre. Je vais maintenant vous montrer sur l'appareil placé devant vous ce qu'on entend par « longueur d'onde »; ce n'est pas la longueur comptée dans le sens de cette crête qu'on voit quelquefois bien marquée dans une vague marine déferlant sur une plage longue et droite: c'est la distance entre les crêtes de deux vagues successives.

TABLE I. — *Données pour la lumière visible.*

RAIES du spectre.	LONGUEURS d'onde en centimètres.	FRÉQUENCES des ondes ou nombres de vibrations par seconde.
A	$7,604 \times 10^{-5}$	$395,0 \times 10^{12}$
B	6,867	437,3
C	6,562	457,7
D_1	5,895	509,7
D_2	5,889	
E	5,269	570,0
b	5,183	
F	4,861	617,9
G	4,307	697,3
H_1	3,967	756,9
H_2	3,933	763,6

[L'appareil dont il est question se composait d'un grand nombre de baguettes de bois horizontales reliées les unes aux autres, et suspendues bifilairement au moyen de deux fils partant du plafond et traversant leurs milieux [2]; quand on déplaçait

---

(1) Pour abréger le langage, et suivant l'exemple de l'auteur, nous appliquerons aux radiations lumineuses les termes bas, élevé, par analogie avec le son; par exemple, par lumière élevée nous entendrons une lumière de faible longueur d'onde; par lumière basse, une lumière de grande longueur d'onde. (P. L.).

(2) Les détails de la suspension bifilaire n'ont pas besoin d'être décrits minu-

la baguette inférieure, une onde ascendante parcourait toute la série.] Imaginons que les extrémités des baguettes représentent des particules. Supposons que les baguettes soient invisibles, leurs extrémités seules étant visibles, et représentant les particules qui agissent les unes sur les autres en vertu de forces élastiques analogues à celles qui sont en jeu dans des rubans de caoutchouc, ou dans des ressorts à boudin en acier, ou dans de la gelée, ou dans toute autre matière élastique de nature quelconque. Dans cet appareil, elles agissent l'une sur l'autre par l'intermédiaire de la monture centrale. Voici encore un autre appareil destiné à montrer des ondes (*fig.* 35) [1]. Les cercles blancs tracés sur les baguettes de

---

tieusement; car la *fig.* 35 représente une nouvelle forme, meilleure et plus facile à réaliser, qui est décrite ci-dessous, et où les actions mutuelles exigées sont fournies par une simple corde de piano en acier.

(1) Voici le mode de construction et les dimensions de cet appareil, qui est représenté dans la *fig.* 35. Il comprend une série de barres semblables et d'égale longueur B dont les extrémités représentent les molécules du milieu considéré; ces barres et la barre pendulaire P, qui joue le rôle d'excitateur de vibrations, ou de réserve cinétique d'énergie vibratoire, sont des morceaux de bois ayant chacun 50^{cm} de longueur, 3^{cm} de largeur, et $1^{cm},5$ d'épaisseur. Le fil de suspension est une corde de piano en acier n° 22 B.W.G. ($0^{cm},07$ de diamètre) et les barres y sont fixées de la manière suivante. Trois chevilles de laiton, de $0^{cm},4$ de diamètre à peu près, sont enfoncées à frottement doux dans chacune des barres, dans la position qu'indique la figure, c'est-à-dire de manière à former les sommets d'un triangle isoscèle dont la base est parallèle à la direction du fil de suspension, et placée à 1^{mm} de distance environ de la ligne suivie par ce fil. Le fil de suspension, pris dans des gorges creusées dans les chevilles, passe sous la cheville supérieure, à l'extérieur de celle qui forme le sommet du triangle, au-dessus de la cheville inférieure, et descend de là vers la barre suivante. La partie supérieure de ce fil passe dans un trou traversant la poutre qui supporte l'appareil, et est enroulée plusieurs fois autour d'une cheville plantée sur un des côtés de la poutre, comme l'indique la figure. A chacune des extrémités de la barre pendulaire est fixé, comme on le voit, un ressort à boudin; la partie supérieure de chacun de ces ressorts est fixée à une courte corde qui traverse un trou percé dans la poutre et qu'on a assujettie en l'enroulant deux ou trois fois autour d'une cheville. Ces ressorts d'acier constituent des réserves potentielles d'énergie vibratoire destinées à se substituer, au cours de chaque vibration, à la réserve cinétique constituée par la barre pendulaire. Les extrémités des barres vibrantes B sont alourdies au moyen de masses de plomb qui y sont attachées. Les masses de plomb plus grandes qu'on voit sur la barre pendulaire peuvent être déplacées sur cette barre; la figure les montre dans la

bois représentent des particules de matière; en ce moment je ne les nommerai pas molécules, bien que dans la suite nous devions les considérer comme des molécules. La lumière consiste dans des vibrations perpendiculaires à la ligne de propagation, exactement comme celles que vous voyez dans les appareils placés sous vos yeux.

Dans la belle expérience bien connue sous le nom d'*anneaux de Newton*, la distance à laquelle doivent se trouver deux morceaux de verre pour produire une couleur déterminée, nous donne de suite une mesure de longueur d'onde.

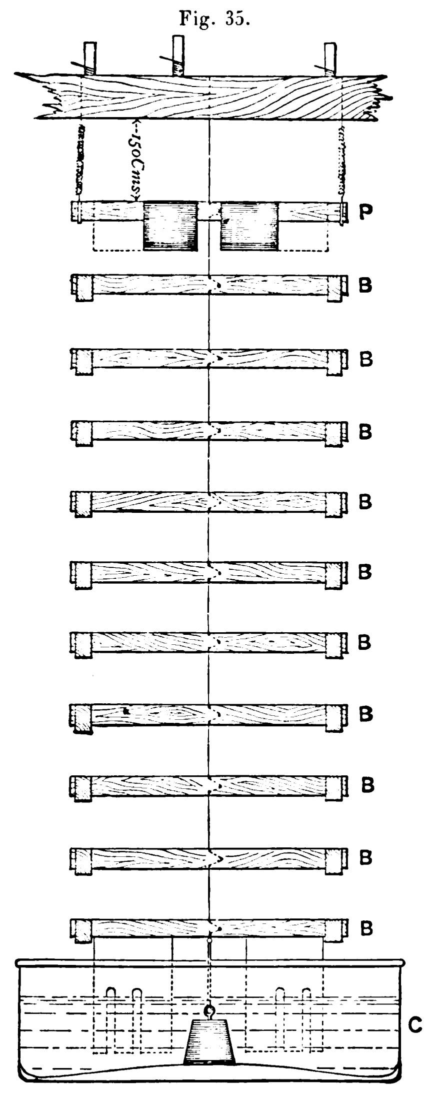
La longueur d'onde est la distance d'une crête à la suivante dans les ondes que vous voyez se propager vers le haut de ce long appareil, quand j'imprime à la barre inférieure une simple oscillation harmonique. Voici une lentille convexe de très long foyer, et un morceau de verre plan noirci sur sa face postérieure. Si j'appuie la lentille convexe contre la face antérieure du morceau de verre plan, je vois les anneaux colorés; on va vous projeter le phénomène sur l'écran, au moyen de la lumière électrique réfléchie par la lame d'air comprise entre les deux morceaux de verre. C'est la théorie ondulatoire de la lumière qui a fourni la première explication de ce phénomène, observé pour la première fois par Sir Isaac Newton. Les anneaux de Newton sont maintenant projetés devant vous sur l'écran au moyen de la lumière électrique réfléchie. Si j'appuie les verres l'un contre l'autre, vous voyez au centre une tache noire; les anneaux apparaissent autour d'elle, et il y a un centre sombre et irrégulier. Il est nécessaire d'appuyer pour obtenir cette tache. Pourquoi? On dit généralement qu'elle

---

position où leur distance est minima. La barre inférieure porte deux ailettes de fer-blanc dirigées vers le bas, et qui plongent dans un liquide visqueux (mélasse délayée dans de l'eau) contenu dans le vase C. Une lourde masse reposant sur le fond du vase, et reliée à l'extrémité inférieure du fil de suspension par une bande de caoutchouc tendu, sert à maintenir dans une position invariable l'extrémité inférieure de l'appareil. On peut donner la grandeur que l'on veut à la période de vibration de la barre pendulaire, soit en déplaçant dans le sens de sa longueur les poids qui y sont attachés, soit en tendant ou relâchant les cordes qui tirent les extrémités supérieures des ressorts à boudin.

est due à ce que le verre repousse le verre à une distance de

Fig. 35.



deux ou trois longueurs d'onde de la lumière, c'est-à-dire à une

distance de $\frac{1}{5\,000}$ de centimètre. Je ne crois pas du tout qu'il en soit ainsi. Cette répulsion apparente provient de l'interposition entre les deux verres de fragments ou de particules de poussière. La tache noire du centre correspond aux endroits où leur distance est inférieure à un quart de longueur d'onde. La longueur d'onde de la lumière jaune est environ de $\frac{1}{17\,000}$ de centimètre et le quart de $\frac{1}{17\,000}$ est environ $\frac{1}{70\,000}$. A l'endroit où vous voyez le milieu de la tache noire, se trouve une lame d'air dont l'épaisseur est inférieure à $\frac{1}{70\,000}$ de centimètre. Passez de cette tache noire aux points du premier anneau qui présentent un maximum d'éclat; si vous ajoutez une demi-longueur d'onde à la longueur précédente, vous aurez la distance des deux morceaux de verre aux points considérés; ajoutez encore une demi-longueur d'onde, et vous arriverez au maximum de lumière suivant; mais la variété des teintes présentées par les anneaux ne nous permet pas d'être très précis dans notre langage; nous avons, en effet, à considérer des longueurs d'onde différentes. Je vais simplifier le phénomène en employant une seule couleur, la couleur rouge, grâce à l'interposition d'un verre rouge. Il n'y a plus maintenant qu'une couleur, mais en même temps il y a beaucoup moins de lumière, parce que le verre rouge laisse passer seule, ou presque seule, une lumière rouge homogène. Regardez maintenant l'image qui s'est formée sur l'écran; la présence de grains de poussière entre les surfaces des deux verres est indéniable. Si j'augmente la pression, je rends la tache centrale plus pâle, en obligeant le verre, qui est élastique, à pivoter pour ainsi dire autour de ces innombrables petits supports constitués par les molécules de poussière; et les morceaux de verre ne sont pas pressés l'un contre l'autre, mais bien contre ces supports. Il y a un très grand nombre, des milliers, de petites particules de poussière prises entre les surfaces des verres; certaines d'entre elles ont peut-être $\frac{1}{3\,000}$ de centimètre de diamètre, soit 5 ou 6 longueurs d'onde. Quand vous mettez un morceau de verre sur un autre, vous croyez presser du verre sur du verre; il n'en est rien, vous pressez le verre sur de la poussière. Ce phénomène est très beau, et je vous ai montré cette expérience simplement

parce qu'elle nous fournit une mesure de longueur qui nous amène de suite au $\frac{1}{100\,000}$ de centimètre.

Je vais maintenant entrer dans quelques détails au sujet des raisons, appuyées sur quatre ordres de considérations, qui nous font assigner une limite à la petitesse des molécules. Je vais d'abord m'occuper, et très brièvement, de l'électricité de contact.

Si je prends ces deux morceaux de zinc et de cuivre et si je les mets en contact par un de leurs bords, ils s'électrisent et s'attirent avec une force parfaitement définie, dont on peut connaître la grandeur au moyen de mesures absolues liées à la théorie, aujourd'hui bien établie, de l'électricité de contact. Je ne sens pas cette attraction, parce qu'elle est très faible, mais on peut s'arranger de manière à la mesurer; on peut placer sur l'un des morceaux de métal une petite protubérance ou saillie métallique de $\frac{1}{100\,000}$ de centimètre, et appuyer l'autre sur cette saillie. Supposez qu'il y ait sur le cuivre trois de ces petits pieds métalliques; touchez maintenant avec l'un d'eux le plateau de zinc, que vous ferez ensuite tourner jusqu'à ce qu'il arrive à toucher les deux autres. Dans cette position, les deux plateaux étant séparés par une lame d'air de $\frac{1}{100\,000}$ de centimètre d'épaisseur, il y aura de l'électricité positive et de l'électricité négative sur les surfaces respectives zinc et cuivre, et en quantités telles que l'attraction mutuelle s'élève à 2^{gr} par centimètre carré. Supposons que l'aire de chacun des deux plateaux soit 1^{cmq} : la grandeur du travail accompli par l'attraction de leurs charges électriques, depuis le moment où on les approche l'un de l'autre après avoir établi entre eux une communication métallique par les bords amenés d'abord en contact, jusqu'au moment où ils sont arrivés à une distance de $\frac{1}{100\,000}$ de centimètre, est $\frac{2}{100\,000}$ de gramme-centimètre.

Permettez-moi de vous lire ce passage d'un article publié il y a trente ans dans *Nature* (¹).

(¹) *Voir* l'article *On the Size of Atoms*, publié dans *Nature*, t. I, p. 551, et imprimé dans la *Philosophie Naturelle* de Thomson et Tait, 2ᵉ édition, 1883, t. I, 2ᵉ Partie, appendice F.



« Amenez maintenant, de la même manière, un second plateau de zinc de l'autre côté du plateau de cuivre, puis un second plateau de cuivre au delà de ce dernier plateau de zinc, et ainsi de suite jusqu'à ce que vous ayez formé une pile comprenant 50001 plateaux de zinc et 50000 plateaux de cuivre, séparés par 100000 intervalles, chacun de ces intervalles, comme chacun de ces plateaux, ayant une épaisseur de $\frac{1}{100000}$ de centimètre. Le travail total accompli par l'attraction électrique, pendant la formation de cette pile, est de 2 grammes-centimètres.

» La masse entière du métal est la masse de 8gr. Donc, la grandeur du travail est de $\frac{1}{4}$ de gramme-centimètre par gramme de métal. Or, d'après l'équivalent mécanique de la chaleur déterminé par Joule, il faut dépenser un travail de 4030 grammes-centimètres pour échauffer de un degré centigrade un gramme de zinc ou de cuivre. Le travail accompli par l'attraction électrique ne pourrait donc échauffer la masse que de $\frac{1}{16120}$ de degré. Que l'épaisseur de chacun des morceaux de métal et de chacun des intervalles devienne maintenant égale à $\frac{1}{100000000}$ de centimètre, au lieu de $\frac{1}{100000}$. Le travail sera devenu un million de fois plus grand, à moins que $\frac{1}{100000000}$ de centimètre ne soit une grandeur voisine de celle d'une molécule. La quantité de chaleur équivalente serait alors suffisante pour élever de 62° la température de la masse. Cela est à peine admissible, si même ce l'est, étant données nos connaissances, ou plutôt notre manque de connaissances au sujet de la chaleur de combinaison du zinc et du cuivre. Supposez que les plateaux métalliques et leurs intervalles deviennent maintenant quatre fois plus minces, c'est-à-dire que leur épaisseur devienne égale à $\frac{1}{400000000}$ de centimètre. Le travail, et la quantité de chaleur équivalente, vont devenir 16 fois plus grands. Cette quantité de chaleur serait donc 990 fois celle qui serait nécessaire pour élever de un degré centigrade la température de la masse, quantité bien supérieure à celle que pourrait dégager la combinaison moléculaire du zinc et du cuivre. Si réellement la chaleur de combinaison était aussi grande, des poudres de zinc et de cuivre mélangées et portées en un de leurs points à la tempé-

rature de fusion du mélange, s'uniraient en dégageant plus de chaleur qu'il n'en faudrait pour les fondre complètement toutes deux; de même, une grande quantité de poudre à canon, quand on vient à l'enflammer en un point, brûle complètement sans intervention nouvelle de la chaleur. D'après cela, des plateaux de zinc et de cuivre de $\frac{1}{300\,000\,000}$ de centimètre d'épaisseur, placés alternativement tout près les uns des autres, seraient bien près de se combiner chimiquement, si vraiment il était possible de faire des plateaux aussi minces sans fendre les atomes. »

Quand on mélange du zinc et du cuivre pour faire du laiton, on ne constate pas de signes bien nets d'affinité chimique; il n'y a pas beaucoup de chaleur dégagée; le mélange ne s'échauffe pas, *il n'est pas explosif.* Nous pouvons donc conclure avec certitude que l'action électrique de contact cesse, ou ne continue pas à croître suivant la même loi, quand la division des métaux est poussée jusqu'au cent-millionième de centimètre. C'est là un argument très important. Je vous fournirai tout à l'heure des données plus positives sur la grandeur des atomes, mais je ne puis donner aucune raison meilleure *pour démontrer qu'on doit assigner une limite à leur petitesse.* Il est impossible d'amener l'épaisseur de fragments de zinc ou de cuivre au-dessous d'une certaine limite, sans les placer dans des conditions telles, qu'ils perdent leurs propriétés en tant que métaux solides distincts; et si on les place tout près l'un de l'autre, leur attraction mutuelle *n'a pas,* dans ces conditions, la valeur que donnerait le calcul fait suivant les règles qui s'appliquent aux plaques plus épaisses. Je pense qu'il est impossible, d'après ce que nous savons des affinités chimiques et des circonstances de la fusion simultanée du zinc et du cuivre, d'admettre qu'on puisse diviser un morceau de zinc ou de cuivre en fragments d'une épaisseur de beaucoup inférieure à $\frac{1}{100\,000\,000}$ de centimètre, si même on peut pousser la division jusque-là, sans séparer les atomes ou diviser les molécules, ou détruire la constitution qui fait du métal solide un tout complet. Bref, les particules constitutives, les briques pour ainsi dire, atomes ou molécules, avec lesquelles sont construits le zinc et le cuivre, ne peuvent pas avoir moins

de $\frac{1}{100\,000\,000}$ de centimètre de diamètre, si même elles peuvent descendre jusque-là; elles peuvent d'ailleurs être beaucoup plus grandes [1].

On peut tirer des conclusions semblables des phénomènes si curieux et si intéressants que présentent les bulles de savon. Les philosophes, vieux ou jeunes, qui s'occupent des bulles de savon, ont à admirer une des choses les plus intéressantes que l'on puisse rencontrer en Physique. Gonflez une bulle de savon et regardez-la; vous pourrez l'étudier pendant toute votre vie peut-être, sans cesser d'en tirer des enseignements sur la Science physique. Vous voyez maintenant sur l'écran l'image d'une membrane d'eau de savon supportée par un anneau de métal. On fait converger sur l'écran la lumière réfléchie par la membrane qui remplit cet anneau. Il s'y produira des colorations analogues à celles des anneaux de Newton. Comme vous le voyez, l'image est renversée. Le liquide coule vers le bas (vers le haut dans l'image) et ce mouvement amincit la membrane autour du point le plus haut. Vous voyez d'abord cette brillante couleur verte. La membrane va s'amincir de plus en plus en cet endroit, et il va se produire de belles gradations de teinte, jusqu'à ce que vous voyiez, comme en ce moment, du rouge foncé; ce rouge devient beaucoup plus clair, puis se transforme en une teinte neutre d'un blanc jaunâtre; voilà ensuite du vert et du bleu, du violet foncé, enfin du noir; mais l'apparition de la tache noire est suivie presque immédiatement de la rupture de la membrane. Cette membrane semble même commencer à perdre sa tension quand son épaisseur devient beaucoup plus faible que le quart de la longueur d'onde de la lumière jaune, épaisseur qui correspond à la teinte neutre précédant le noir final. Quand vous vous lavez les mains vous pouvez, dans un anneau formé par les pouces et les index de vos deux mains, produire et observer tout à votre aise une membrane semblable à celle-ci, et en suivre les colorations. Quand vous commencez à voir une tache noire ou plusieurs taches noires, la membrane est sur le point de crever. La membrane conserve sa résistance jusqu'à

[1] *Voir* LIPPMANN, *Comptes rendus* et *Journal de Physique*, 1882.

Voir "les hypothèses moléculaires" par Jean Perrin (Revue scientifique du 13 Avril 1901. p 451)

l'apparition de la tache noire, aux divers points de laquelle l'épaisseur est évidemment bien inférieure à $\frac{1}{60000}$ de centimètre, ce qui est l'épaisseur correspondant à la teinte neutre (¹).

Dans le passage suivant de son *Optique* (p. 187 et 191 de l'édition de 1721, Livre II, Iʳᵉ Partie), Newton en dit, sur cet important phénomène de la tache noire, plus que n'en savent un grand nombre d'observateurs modernes.

« *Observation* 17. — Tout le monde a observé que si l'on souffle une bulle avec de l'eau à laquelle on aura donné de la cohésion en y dissolvant un peu de savon, cette bulle, au bout d'un certain temps, paraîtra teinte de couleurs variées. Pour empêcher ces bulles d'être agitées par l'air ambiant (ce qui déplace et entremêle leurs couleurs de manière à rendre impossible toute observation exacte), dès que j'en avais soufflé une je la couvrais d'un verre propre, et grâce à cette précaution les couleurs apparaissaient très régulièrement disposées, comme autant d'anneaux concentriques entourant le sommet de la bulle. Et à mesure que la bulle devenait plus mince, grâce au continuel écoulement de l'eau vers le bas, ces anneaux se dilataient lentement, envahissaient la bulle tout entière, et descendaient les uns après les autres vers la partie inférieure où ils s'évanouissaient successivement. Sur ces entrefaites, après que toutes les couleurs avaient apparu au sommet, il se développait au centre des anneaux une petite tache noire, ronde, semblable à celle de la première observation et qui se

(¹) Depuis que cette Conférence a été faite, MM. le Professeur Reinold et Rücker ont communiqué à la Société Royale un Mémoire *Sur l'épaisseur limite des membranes liquides* dont un extrait a été publié dans les *Proceedings*, 19 avril 1883. Les auteurs donnent les résultats suivants pour l'épaisseur de la membrane noire avec les liquides indiqués :

Liquides.	Méthode.	Épaisseur moyenne.
Liquide glycérique de Plateau...	Électrique	$0,119 \times 10^{-6}$ cm
» » ...	Optique	0,107 »
Solution de savon..............	Électrique	0,117 »
»	Optique	0,121 »

Donc, l'épaisseur d'une pellicule de *liquide glycérique* et celle d'une pellicule de solution de savon ne contenant pas de glycérine sont à peu près les mêmes, et environ $\frac{1}{50}$ de la longueur d'onde de la lumière du sodium.



dilatait continuellement jusqu'à acquérir quelquefois plus de $\frac{1}{2}$ pouce ou de $\frac{3}{4}$ de pouce [1] de largeur avant que la bulle crevât. Au début, je pensais qu'en cet endroit l'eau n'avait pas réfléchi de lumière, mais en observant la tache avec plus d'attention je vis dans son intérieur plusieurs taches rondes plus petites, qui apparaissaient beaucoup plus noires et plus sombres que le reste; je reconnus par là qu'il y avait réflexion aux autres points, qui étaient moins sombres que ces taches. En poursuivant les expériences, je trouvai qu'il m'était possible de voir les images de quelques objets (celle d'une chandelle, ou du Soleil, par exemple) très faiblement réfléchies, non seulement par la grande tache noire, mais aussi par les petites taches plus sombres qui étaient au dedans d'elle.

» *Observation* 18. — Si l'eau n'avait pas une grande cohésion, les taches noires apparaissaient de suite dans le blanc sans que le bleu se produisît d'une manière sensible. Et quelquefois, elles apparaissaient brusquement dans le jaune qui le précède, ou dans le rouge, ou peut-être dans le bleu du second ordre, ne laissant pas aux couleurs intermédiaires le temps de se développer. »

Voici maintenant une raison, et une raison sans réplique, qui permet de dire que la membrane ne peut pas conserver sa résistance à l'extension lorsqu'elle a été réduite à une épaisseur de $\frac{1}{100000000}$ de centimètre: c'est que le travail qui serait nécessaire pour augmenter un peu son étendue suffirait pour la réduire en vapeur.

La théorie de l'attraction capillaire montre que, quand une bulle, une bulle de savon, par exemple, devient de plus en plus grande, du travail est accompli en raison de l'augmentation de la surface de la membrane, qui résiste à l'extension comme le ferait une membrane élastique douée d'une force de contraction constante. Cette force de contraction doit être évaluée en unités de force par unité de longueur. L'observation de l'ascension de l'eau dans les tubes capillaires montre que la force de contraction d'une mince pellicule d'eau est d'environ

---

(1) Le pouce anglais vaut $0^m,0254$.

16 milligrammes par millimètre de longueur. Donc, quand, en étirant une membrane aqueuse, on a diminué son épaisseur d'une certaine quantité, le travail accompli, mesuré en milligrammes-millimètres, est égal à 16 fois le nombre de millimètres carrés dont la surface a été augmentée, à condition que la membrane n'ait pas été assez amincie pour qu'il y ait eu une diminution sensible de la force de contraction. Dans un article « Sur l'effet thermique de l'extension d'une membrane de liquide », publié dans les *Proceedings* de la Société Royale pour avril 1858, j'ai montré, d'après la seconde loi de la Thermodynamique, qu'il faut donner en plus à la membrane, sous forme de chaleur, à peu près la moitié de cette quantité d'énergie, pour empêcher sa température de s'abaisser pendant l'extension. Donc, l'énergie intrinsèque d'une masse d'eau en forme de membrane, maintenue à une température constante, s'accroît de 24 milligrammes-millimètres pour chaque millimètre carré ajouté à sa surface.

Supposez donc que vous ayez une membrane épaisse de 1 millimètre, et que sa surface vienne à être augmentée de 10000 fois sa grandeur : le travail accompli par millimètre carré de la membrane primitive, c'est-à-dire par milligramme de la masse, serait de 240000 milligrammes-millimètres. La chaleur équivalente correspond à une élévation de température de la substance d'un peu plus d'un demi-degré centigrade (0°,57). L'épaisseur à laquelle la membrane est réduite dans cette hypothèse est très approximativement $\frac{1}{10000}$ de millimètre. L'observation la plus vulgaire sur les bulles de savon montre que la force de contraction n'éprouve pas de diminution sensible quand l'épaisseur est réduite à $\frac{1}{10000}$ de millimètre, attendu que l'épaisseur qui correspond au premier maximum de lumière autour de la tache noire que l'on voit à l'endroit où la membrane est le plus mince, est seulement $\frac{1}{6000}$ de millimètre environ.

La faible quantité de travail indiquée dans les évaluations précédentes est tout à fait compatible avec cette réduction. Mais supposez maintenant que la membrane soit encore étirée jusqu'à ce que son épaisseur soit réduite à $\frac{1}{10000000}$ de millimètre ($\frac{1}{100000000}$ de centimètre). Le travail dépensé va

être mille fois plus grand que celui que nous venons de calculer. La quantité de chaleur équivalente est 570 fois la quantité nécessaire pour élever de 1° C. la température du liquide. Ce travail est certainement de beaucoup supérieur à celui que peut produire l'extension d'une membrane liquide. Il est supérieur à celui qui, dépensé sur le liquide, le convertirait en vapeur sous la pression atmosphérique ordinaire. La conclusion inévitable de tout ceci est qu'une membrane aqueuse perd beaucoup de sa force de contraction avant d'être réduite à une épaisseur de $\frac{1}{10\,000\,000}$ de millimètre. Quelle que soit la théorie moléculaire que l'on imagine, il est à peine possible d'admettre que la force de contraction puisse éprouver une diminution considérable aussi longtemps qu'il y a plusieurs molécules dans l'épaisseur. Il est donc probable qu'il n'y a pas plusieurs molécules dans l'épaisseur de $\frac{1}{10\,000\,000}$ de millimètre d'eau.

Puisque nous nous occupons de la division de la matière, regardez les belles couleurs que vous montre cette petite boîte, léguée, je crois, à l'Institution Royale par le professeur Brande. Elle contient des barres d'acier poli, qu'on a colorées en les portant à diverses températures, comme on le fait pour recuire l'acier fortement trempé. Ces couleurs, produites par la chaleur sur d'autres métaux polis, comme sur l'acier, sont dues à de minces couches d'oxyde transparent, et leurs teintes, comme celles des bulles de savon et de la petite lame d'air dans les « anneaux de Newton », dépendent de l'épaisseur de la couche, qui dans le cas des métaux oxydables résulte de la combinaison du métal avec l'oxygène de l'air sous l'influence de la chaleur, en vertu d'une véritable combustion superficielle.

Vous connaissez tous les franges colorées, si brillantes et si belles, que développe la chaleur sur les tisonniers et les grilles d'acier poli, quand ces ustensiles échappent à la funeste règle d'esthétique domestique d'après laquelle on les conserve trop souvent reluisants, froids et inutiles, au lieu de leur permettre de montrer ces charmants jeux de lumière que la chaleur produit naturellement et nécessairement quand on en fait l'usage qui est leur raison d'être. L'é-

paisseur de la couche d'oxyde qui donne naissance à la première couleur perceptible est égale à $\frac{1}{100\,000}$ de centimètre à peu près ([1]), c'est-à-dire un peu plus faible que le quart de la longueur d'onde de la lumière violette : cette teinte, orangé très pâle ou chamois, est due à l'interférence des rayons réfléchis par les deux faces de la lame, interférence qui éteint partiellement ou complètement le violet, détermine un affaiblissement du bleu, et un affaiblissement de moins en moins grand des autres couleurs prises dans leur ordre naturel.

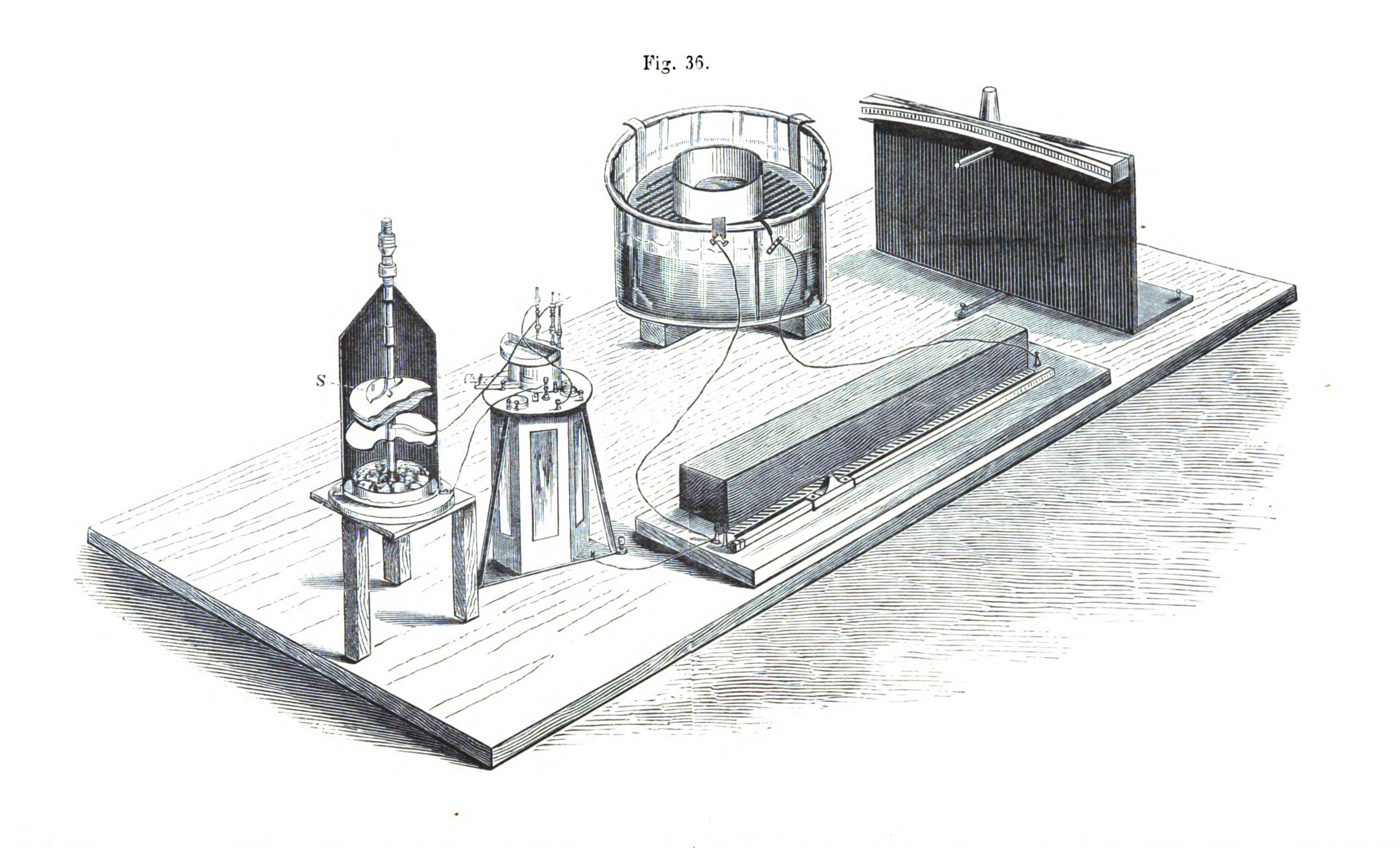
La grande facilité avec laquelle l'électricité permet de chercher et de trouver des indications vient ici à notre aide; et grâce à la force répartie, pour ainsi dire, sur la couche considérée, nous pouvons reconnaître l'existence de cette couche lorsque son épaisseur est bien inférieure à $\frac{1}{100\,000}$ de centimètre, lorsqu'en réalité cette épaisseur est si faible que la couche ne produit pas d'effet appréciable sur la lumière réfléchie ([2]), c'est-à-dire est absolument invisible. Si, dans l'appareil destiné à mesurer l'électricité de contact, appareil dont le dessin est devant vous (*Nature*, t. XXIII, p. 567) (*fig.* 36), on adapte au condensateur de Volta deux plaques de cuivre fraîchement poli, l'effet obtenu est rigoureusement nul. Qu'on enlève alors un des plateaux, qu'on le chauffe légèrement en le plaçant sur un morceau de fer chaud et qu'après l'avoir laissé refroidir on le replace sur le condensateur de Volta; on constatera une condensation d'électricité négative sur la surface ainsi traitée, et d'électricité positive sur la sur-

---

([1]) L'épaisseur est peut-être sensiblement moindre, car la réflexion normale à la surface de séparation de l'oxyde transparent et du métal est accompagnée d'un retard de $\frac{3}{4}\lambda$ environ (Wiener, 1890); quand la couche transparente est épaisse, le retard entre les deux rayons interférents est environ $\frac{3\lambda}{4} + 2e - \frac{\lambda}{2}$ ou $\frac{\lambda}{4} + 2e$ et, puisqu'il vaut $2\frac{\lambda}{4}$, c'est que l'épaisseur e est environ $\frac{1}{8}$ de la longueur d'onde. (M. B.)

([2]) Les plus faibles épaisseurs d'argent déposé sur verre, dont la présence soit manifestée par un changement appréciable dans les propriétés de la lumière réfléchie, ne tombent pas beaucoup au-dessous de un millionième de millimètre (10^{-7} centimètre) (Wiener, 1887.) (M.B.)

Fig. 36.



face brillante placée en regard, quand on réunira métalliquement les deux plateaux. Si l'on répète les mêmes opérations en élevant un peu la température, ou en augmentant la durée de l'échauffement, on voit que la différence électrique est augmentée. Cet effet est déjà très sensible avant qu'aucune coloration appréciable apparaisse sur la surface modifiée par la chaleur. Il va en croissant avec la température du corps chauffé, jusqu'au moment où les colorations de l'oxyde commencent à apparaître; la teinte, d'abord chamois, passe au rouge vermeil, puis au bleu d'ardoise sombre; à partir de ce moment, l'effet ne paraît pas augmenter, quand on continue à chauffer. La plus grande différence électrique que j'aie ainsi obtenue entre une surface de cuivre fraîchement polie et une surface rendue presque noire par l'oxydation était neutralisée, dans mon expérience, par la moitié environ de la force électromotrice d'un couple Daniell ([1]).

Des expériences faites il y a quinze ans avec des plaques d'argent poli, et que je n'ai pas encore publiées, m'ont montré d'une manière frappante un effet électrique dû à une trace infinitésimale de vapeur d'iode. La modification des propriétés de la surface au point de vue de l'électricité de contact semble se poursuivre d'une manière continue dès la première rencontre du métal (rencontre tout à fait impossible à reconnaître par d'autres moyens), avec quelques atomes ou quelques molécules d'une substance capable de l'attaquer (oxygène, iode, soufre ou chlore par exemple); l'effet paraît aller en croissant jusqu'à ce que la couche d'oxyde ou d'iodure, ou de toute autre combinaison qui ait pu se former, ait atteint $\frac{1}{30\,000}$ ou $\frac{1}{40\,000}$ de centimètre.

Cette question mérite qu'on entreprenne des expériences beaucoup plus exactes que celles qu'on lui a consacrées jus-

([1]) Ces expériences ont été décrites pour la première fois dans une lettre à Joule, publiée dans les *Proceedings of the Litterary and Philosophical Society of Manchester*, du 21 janvier 1862 (*Reprints of Papers on Electrostatics and Magnetism*, Art. XXII); dans cette lettre je démontrais pour la première fois, par des mesures d'électricité de contact, qu'il y a une limite à la petitesse des molécules. La méthode de mesure est complètement décrite dans l'article de *Nature* cité plus haut (t. XXIII, p. 567).



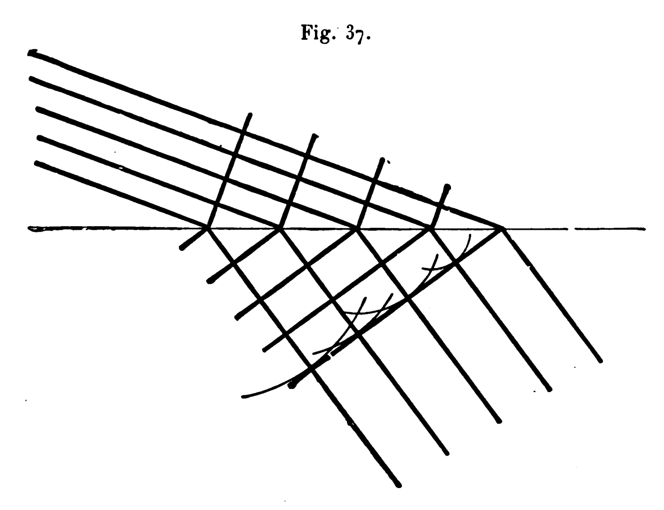
qu'à présent. J'en parle en ce moment, pour vous montrer comment ces actions électriques nous permettent, en quelque sorte, de sonder la profondeur de l'océan de molécules appelé sur la surface du métal par le gaz ou la vapeur qui entre en combinaison avec lui.

Quand l'épaisseur des métaux solides devient très inférieure à une longueur d'ondulation, ils deviennent transparents. Grâce à l'obligeance de M. le Professeur Dewar, je puis vous montrer des feuilles de platine, d'or et d'argent extrêmement minces, dont on a mesuré l'épaisseur et qu'on a placées entre des plaques de verre. La feuille de platine a $1,9 \times 10^{-5}$ centimètres d'épaisseur, et est tout à fait opaque; mais voici une feuille d'or dont l'épaisseur est à peu près la même, qui est transparente pour la lumière électrique, et laisse passer la belle couleur verte que vous voyez sur l'écran. L'épaisseur de cette feuille d'or ($1,9$ ou près de 2×10^{-5} centimètres) est juste égale à la demi-longueur d'onde de la lumière violette dans l'air. Cette feuille d'or, en même temps qu'elle transmet la lumière verte qui vient frapper l'écran, réfléchit vers le plafond, comme vous le voyez, de la lumière jaune. Je vais maintenant vous montrer la feuille d'argent. Elle est plus mince; son épaisseur n'est que de $1,5 \times 10^{-5}$ centimètres, ou les $\frac{3}{8}$ de la longueur d'onde du violet dans l'air. Elle est tout à fait opaque pour la lumière électrique, autant que vos yeux vous permettent d'en juger, et réfléchit toute la lumière vers le plafond. Il n'y a rien d'étonnant à ce qu'elle soit opaque; vous pourriez vous étonner qu'il en fût autrement; mais il y a une lumière ultra-violette, invisible, correspondant à un petit nombre de radiations voisines et comprenant une raie du zinc dont la longueur d'onde dans l'air est égale à $3,4 \times 10^{-5}$ centimètres, que transmet cette pellicule d'argent. Pour cette lumière particulière, la feuille d'argent de $1,5 \times 10^{-5}$ centimètres est transparente. L'image que vous voyez maintenant sur l'écran est la représentation agrandie de l'impression photographique produite par le spectre de la lumière qui a réellement traversé cette feuille d'argent. Vous voyez très nettement la raie du zinc, près du milieu de l'image. Voici donc de l'or et de l'argent transparents. L'argent est

opaque pour toutes les radiations autres que celles dont la longueur d'onde est comprise entre 3,07 et $3,32 \times 10^{-5}$ centimètres environ.

Les différences de réfrangibilité des diverses couleurs constituent un fait d'une importance capitale, dans la question de la dimension des atomes. Vous voyez maintenant sur l'écran le spectre du prisme, phénomène bien connu dû à l'inégalité des déviations qu'éprouvent les diverses couleurs en traversant le prisme. Pour expliquer ce phénomène dans la théorie ondulatoire de la lumière, les mathématiciens ont dû faire appel à toutes les ressources de leur talent. Mais, pour commencer par ce qui est facile, regardez le dessin placé devant vous (*fig.* 37); il vous fera comprendre facilement

Fig. 37.



Dessin de la construction d'Huygens pour le front de l'onde réfractée; la lumièr passe de l'air dans le flint-glass.

que la réfraction est due à la différence des vitesses de propagation de la lumière dans les deux milieux transparents considérés. Les angles du dessin sont à peu près exacts pour la réfraction relative à la surface de séparation entre l'air ou le vide et le flint-glass; vous voyez que, dans ce cas, la vitesse de propagation a la valeur la plus faible dans le milieu le

plus dense. Le plus réfringent des deux milieux (qui n'est pas toujours le plus dense) est celui qui transmet le moins vite la lumière. L' « indice de réfraction » d'un milieu transparent est le rapport de la vitesse de propagation dans l'éther à la vitesse de propagation dans la substance transparente.

Que la vitesse de propagation de la lumière soit différente dans les différents milieux, et soit le plus souvent plus petite dans le milieu le plus dense que dans le moins dense, les principes de la Dynamique devaient le faire prévoir, quelque constitution qu'on pût raisonnablement assigner à l'éther lumineux et aux substances transparentes tangibles. Mais que dans un même milieu transparent, la vitesse de propagation ait des valeurs différentes pour des lumières de différentes couleurs, c'est-à-dire ayant des périodes de vibration différentes, voilà ce que nous ne pouvions attendre; et cela serait impossible, si le milieu était homogène, à moins qu'il n'y ait une limite à la petitesse des parties dont on compare les propriétés. D'après moi, le fait que la vitesse de propagation *dépend* de la période prouve d'une manière irréfutable que la substance des corps transparents tangibles tels que l'eau, le verre ou le sulfure de carbone de ce prisme dont vous voyez le spectre devant vous, n'est pas homogène jusque dans ses parties les plus petites; bien au contraire, nous découvrirons dans un pareil milieu (un milieu capable de donner les couleurs du prisme) une hétérogénéité complète, si nous examinons des portions contiguës dont les distances ne soient pas incomparablement plus faibles que les longueurs d'onde; cette hétérogénéité est comparable aux différences que nous relevons dans la matière tangible, entre l'état solide et l'état liquide, ou entre des substances de densités très différentes; elle peut encore être comparée aux différences dans la vitesse et la direction du mouvement, pour différentes positions d'un anneau tourbillon dans un liquide homogène; ou encore aux différences entre les matériaux occupant l'espace considéré, comme celles que nous trouvons dans une grande construction en briques, quand nous passons d'une brique à une autre à travers le mortier (ou à travers *un vide,* comme cela arrive trop souvent dans les cheminées en briques des maisons écossaises).

Cauchy le premier, je crois, parmi les mathématiciens et les physiciens, a eu l'audace de se laisser entraîner à la conclusion qu'il n'est possible d'expliquer la dispersion que par un certain degré de discontinuité dans la matière réfringente transparente, dont la structure serait grossièrement granulaire; d'ailleurs, de quelque manière que nous envisagions la question, et quelles que soient les modifications de détail que nous puissions être obligés d'introduire dans les hypothèses de Cauchy sur la structure et les actions moléculaires, nous sommes de plus en plus confirmés dans l'opinion qu'une telle structure de la matière transparente tangible est la cause des différences entre les vitesses de propagation des lumières diversement colorées; nous devons donc regarder Cauchy comme le créateur de la théorie dynamique des couleurs du prisme.

Mais nous arrivons maintenant à la grande difficulté de la théorie de Cauchy ([1]). Regardez ce petit Tableau (Table II)

TABLE II. — *Vitesse* V *d'après le nombre* N *des particules comprises dans la longueur d'onde.*

N.	$V = 100 \dfrac{\sin\frac{\pi}{N}}{\frac{\pi}{N}}$.
2	63,64
4	90,03
8	97,45
12	98,86
16	99,36
20	99,59
∞	100,00

et vous verrez en tête la formule qui donne la vitesse en fonction du nombre des particules comprises dans une lon-

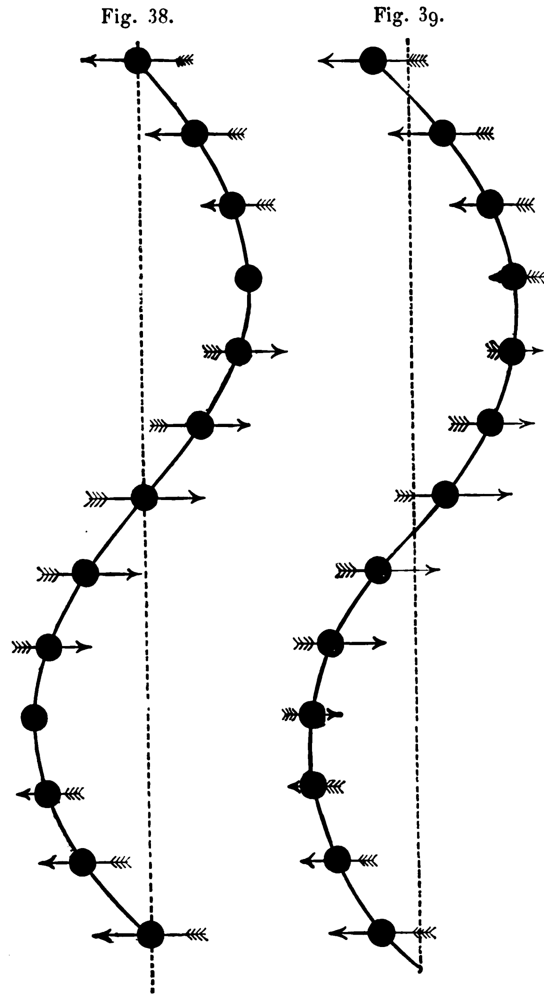
([1]) Pour l'exposé de la théorie dynamique de la « Dispersion de la lumière », voyez *View of the Undulatory Theory as applied to the Dispersion of Light*, par le Rév. Baden Powell, M. A. etc. (London, 1841).



gueur d'onde, en supposant que le milieu est constitué par des particules égales formant un réseau cubique, et que chacune d'elles attire les six particules les plus voisines avec une force proportionnelle à l'excès de la distance sur une certaine ligne constante (la longueur de cette ligne doit être déterminée d'après le degré de compressibilité du solide élastique que nous voulons ainsi représenter par une agglomération de molécules douées d'actions mutuelles). Imaginez de petits corps réels formant un réseau cubique; attachez à chacun six ressorts à boudin en acier, ou six rubans de caoutchouc, que vous tendrez entre lui et les six corps les plus voisins; cet appareil vous permettra de réaliser la force considérée avec toute l'exactitude nécessaire; et s'il nous était possible de transporter *au gré de nos désirs* l'amphithéâtre de l'Institution Royale au centre de la Terre et de l'y maintenir pendant cinq minutes, j'aurais grand plaisir à vous montrer un modèle de solide élastique ainsi constitué, et des ondes se propageant dans ce solide comme les ondes lumineuses se propagent dans l'éther lumineux. Malheureusement, dans la position que nous occupons, la pesanteur nous gêne et m'empêche de vous montrer tout cela en ce moment. En revanche, voici deux appareils à ondes (voyez *fig.* 35, p. 103) qui vous montrent tous deux le déplacement et le mouvement d'une ligne de particules pendant la propagation d'une onde à travers notre solide imaginaire à trois dimensions; la file de molécules choisie comprend celles qui, dans l'état d'équilibre, constituent une des lignes droites directrices du réseau, et nous supposons le front de l'onde perpendiculaire à cette droite, la vibration s'effectuant suivant l'une des deux autres directrices.

Voici encore une série de dessins (*fig.* 38 à 43) représentant des ondes dans un solide élastique de structure moléculaire discontinue. Ces deux dessins (*fig.* 38 et 39) représentent l'onde dans le cas où il y a douze molécules dans sa longueur; celui-ci (*fig.* 38) montre (par la longueur et la position des flèches) la grandeur et la direction de la vitesse de chaque molécule à l'instant où l'une d'elles est sur la crête de l'onde, ou atteint son élongation maxima; celui-là (*fig.* 39)

montre la grandeur et la direction des vitesses quand l'onde a avancé d'une quantité telle (ici $\frac{1}{24}$ de la longueur d'onde) que

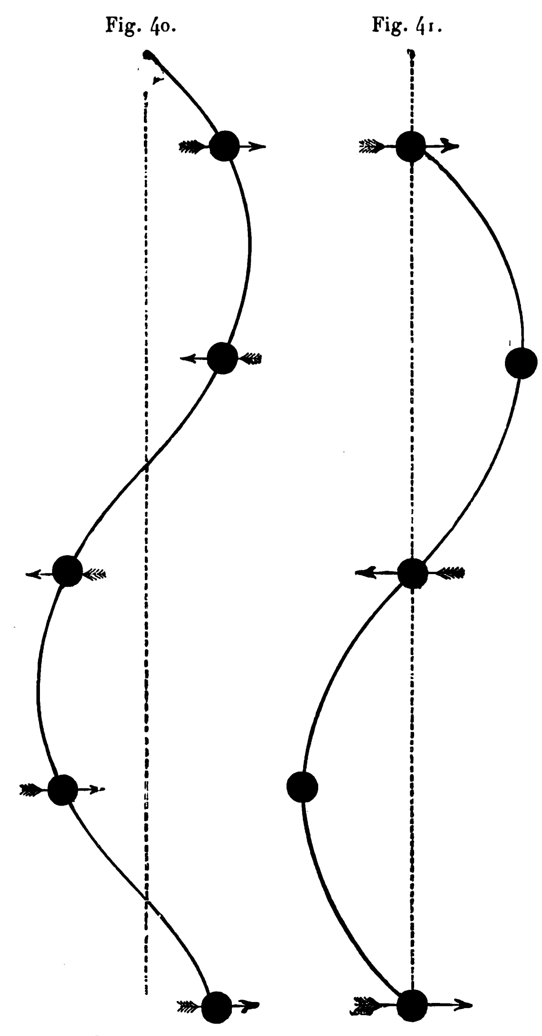


Douze particules dans la longueur d'onde.

sa crête soit au milieu de la distance de deux molécules. Ces deux dessins (*fig.* 40 et 41) donnent les mêmes indications

pour une onde dont la longueur embrasse quatre molécules,

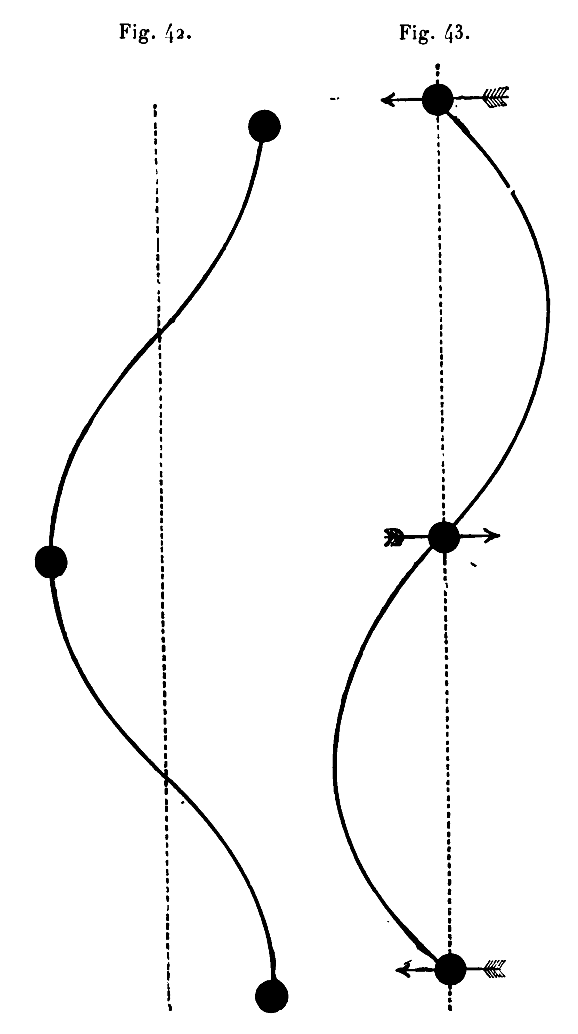
Fig. 40. Fig. 41.



Quatre particules dans la longueur d'onde.

et ces deux autres (*fig.* 42 et 43) pour une onde dont la longueur embrasse deux molécules.

Plus on s'approche de ce cas critique, c'est-à-dire plus la



Deux particules dans la longueur d'onde.

longueur de l'onde est voisine de cette limite inférieure égale à deux fois la distance de molécule à molécule, plus est faible

la différence entre les deux formes de mouvements constituées par deux ondes se propageant en sens inverse. Dans le cas extrême ou critique, la différence est nulle, et le mouvement n'est pas un mouvement ondulatoire, mais un cas particulier de ce qu'on a souvent appelé *vibration stationnaire*. Avant de terminer cette conférence, je compte vous expliquer en détail l'espèce de mouvement qui remplace le mouvement ondulatoire (devenu imaginaire au point de vue mathématique), quand la période de la vibration excitatrice est un peu inférieure à la valeur critique. Ce cas a une importance et un intérêt très grands en Optique physique, relativement à l'explication, encore inédite, que Stokes a donné de la phosphorescence.

Cette hypothèse, d'après laquelle chaque molécule n'agirait directement que sur les six molécules les plus voisines, n'est pas tout à fait le point de départ de l'œuvre de Cauchy. Il suppose que chaque molécule exerce autour d'elle, dans toutes les directions, des actions qui décroissent rapidement quand la distance augmente; mais alors l'influence de la dimension et de la distance des molécules sur la vitesse de propagation doit être plus faible qu'elle ne l'est dans l'hypothèse simple dont les appareils et les dessins qui sont sous vos yeux, constituent une réalisation; cette hypothèse correspond donc à la limite extrême au delà de laquelle il n'est plus possible d'expliquer par la théorie de Cauchy, sans la modifier, le phénomène de la dispersion ([1]).

En examinant la petite Table (Table II, p. 119) qui donne les résultats calculés, vous reconnaîtrez que, s'il y a seulement vingt molécules dans la longueur d'onde, la vitesse de propagation est les 99,5 centièmes de ce qu'elle serait pour un nombre infini de molécules; donc, la plus grande différence de vitesse de propagation qu'il soit possible d'expliquer par la théorie de Cauchy, même dans le cas idéal où l'action mutuelle est limitée aux molécules les plus voisines, s'élève à $\frac{1}{200}$. Examinez maintenant ce Tableau des indices de réfraction

([1]) Dans la théorie de Cauchy, c'est l'éther lui-même qui est supposé formé de molécules séparées. (M. B.)

(Table III) et vous verrez que la différence des vitesses de la radiation rouge A et de la radiation violette H s'élève dans le sulfure de carbone à $\frac{1}{17}$; dans le flint lourd, à près de $\frac{1}{30}$; dans le crown dur, à $\frac{1}{73}$; et dans l'eau et l'alcool, à un peu plus de $\frac{1}{100}$.

TABLE III.

RAIES du spectre.	SUBSTANCES.				
	Crown-glass dur.	Flint-glass extradense.	Eau à 15°.	Sulfure de carbone à 11°.	Alcool à 15°.
A............	1,5118	1,6391	1,3284	1,6142	1,3600
B............	1,5136	1,6429	1,3300	1,6207	1,3612
C............	1,5146	1,6449	1,3307	1,6240	1,3621
D............	1,5171	1,6504	1,3324	1,6333	1,3638
E............	1,5203	1,6576	1,3347	1,6465	1,3661
b............	1,5210	1,6591	...	...	...
F............	1,5231	1,6642	1,3366	1,6584	1,3683
G............	1,5283	1,6770	1,3402	1,6836	1,3720
h............	1,5310	1,6836	...	...	...
H............	1,5328	1,6886	1,3431	1,7090	1,3751

Les nombres des deux premières colonnes ont été déterminés par le Dr Hopkinson, ceux des trois dernières par MM. Gladstone et Dale. L'indice de réfraction de l'air pour la lumière voisine de la raie E est 1,000294.

Donc, pour aucune de ces substances, le nombre des molécules comprises dans une longueur d'onde ne peut atteindre vingt, si l'on admet sans modification la théorie de la dispersion de Cauchy; en vous reportant à la Table II de la page 119, vous reconnaîtrez que, dans une longueur d'onde de lumière violette, il ne peut y avoir plus de douze molécules d'eau ou d'alcool, dix de crown dur, huit de flint lourd et quatre de sulfure de carbone, si l'on conserve, pour expliquer la dispersion, la théorie de Cauchy. Un tel éloignement des molécules, dans les corps transparents ordinaires, liquides ou solides, est tout à fait inadmissible (1). Avant de terminer, j'ai l'intention de

(1) *Voir* à l'Appendice.

vous montrer que la théorie cinétique des gaz assigne à la grandeur des molécules une *limite supérieure,* d'après laquelle il est probable qu'il y a environ six cents molécules de verre ou d'eau dans une longueur d'onde, et presque certain qu'il n'y en a *pas moins* de 200, 300 ou 400. Mais, même en dehors de cette détermination d'une limite supérieure de la grandeur des molécules, bien des raisons empêchent d'admettre comme probable ou possible qu'il puisse y en avoir seulement 4,5 ou 6 dans une longueur d'onde. Quand bien même la théorie et les observations relatives à la réflexion de la lumière sur les surfaces polies ne viendraient pas montrer l'impossibilité de l'existence d'une longueur d'onde comprenant cinq ou six molécules seulement, le seul tracé, exécuté par Nobert, de 4000 traits dans la longueur de $0^{cm},1$, ou 40000 dans celle de 1 centimètre, ou 2 environ dans la longueur d'onde dans l'éther de la radiation bleue F [1], serait, semble-t-il, une réfutation suffisante de cette opinion.

Il faut donc trouver une autre explication pour la dispersion, et je crois qu'il y en a une; je crois que, tout en introduisant des modifications dans la théorie de Cauchy, nous pourrons appliquer le principe général sur lequel elle repose; je crois qu'en supposant chaque molécule alourdie dans une proportion déterminée, par une liaison élastique avec une matière plus dense (chaque molécule d'éther ayant en quelque sorte, dans la matière transparente tangible, une faible bordure de particules de plus en plus grandes, à mesure qu'elles s'éloignent davantage de la molécule, et rattachées à elle par des liaisons élastiques), nous aurions une explication mécanique grossière; il serait facile de la réaliser en ajoutant des dispositions convenables aux appareils dynamiques que je vous ai indiqués pour rendre compte de la dispersion par réfraction dans une structure à molécules infiniment rapprochées. Il n'y a pas dix-sept heures que j'ai aperçu la possibilité de cette explication. Je la vois maintenant très bien, mais vous m'ex-

(1) LOSCHMIDT, d'après le Rapport sur la Section du Zollverein à l'Exposition internationale de Londres de 1862, p. 83, et d'après *Le Microscope* de Harting, p. 881 (*Sitzungsberichte der Wiener Akademie Math. Phys.*, 1865, t. III).

cuserez si je ne pénètre pas plus avant dans la théorie en ce moment [1]. Les difficultés que soulève la théorie de Cauchy m'ont fort embarrassé quand j'ai songé à traiter ce sujet devant vous. Je ne pouvais pas vous l'exposer et dire qu'il n'y a que quatre particules dans la longueur d'onde, je ne pouvais pas davantage vous l'exposer sans vous dire qu'il y a d'autres explications. Je crois qu'on aura certainement une autre explication en cherchant dans le sens que j'ai indiqué rapidement.

Regardez maintenant ces belles colorations distribuées sur l'écran qui est sous vos yeux. Ce sont des spectres de diffraction produits par ce morceau de verre rayé de 800 traits au centimètre. Regardez encore, voici un spectre de diffraction produit par réflexion sur un des réseaux de Rutherford, de 6700 traits au centimètre, gravé sur un miroir de métal poli. L'explication de ce phénomène par les *interférences* est la même, en substance, que celle que donne la théorie ondulatoire pour les anneaux de Newton formés par la réflexion de la lumière sur deux surfaces, et que vous avez déjà vus. Quand les ondes lumineuses qui émanent des ouvertures placées entre les traits successifs du réseau ont la même phase au point où elles atteignent l'écran, elles y produisent de la lumière; au contraire, si leurs phases sont opposées, elles y produisent de l'obscurité.

Les belles couleurs que vous voyez sont dues à ce que les points de l'écran où les vibrations sont concordantes ou discordantes sont différents pour les lumières de longueurs d'onde différentes; c'est par la mesure des dimensions d'un spectre de diffraction semblable au premier que vous avez vu (ou de spectres plus petits produits par des réseaux plus

---

(1) Un examen plus approfondi m'a paru confirmer cette première impression; et dans un Mémoire *Sur la théorie dynamique de la dispersion*, lu devant la Société Royale d'Édimbourg, le 5 mars, j'ai consigné des recherches mathématiques sur ce sujet. (W. T., 16 mars 1883.)

Les *Proceedings* de cette Société ne contiennent que le titre du Mémoire; Sir W. Thomson a donné sur ce point des développements dans ses Conférences autographiées faites en octobre 1884 à l'Université John Hopkins *On Molecular Dynamics and the Wave Theory of Light*. On en trouvera une analyse étendue à la fin du Volume. (M. B.)



grossiers) que Fraunhofer détermina d'abord les longueurs d'onde des diverses couleurs.

Grâce au Dr Tyndall, je puis maintenant vous montrer une expérience très belle et très intéressante, qu'il a imaginée et qui a des rapports étroits avec la question de la dimension des atomes; c'est le *ciel bleu* artificiel, dû à un effet très remarquable de la lumière sur la matière. Voici un tube de verre vide, c'est-à-dire *optiquement vide*. Il est traversé en ce moment par un faisceau de lumière électrique et vous ne voyez rien. On supprime maintenant la lumière, et l'on fait entrer dans le tube de la vapeur de sulfure de carbone. On y introduit cette vapeur à une pression de 8^{cm} environ, et avec elle de l'air mélangé d'un peu d'acide nitrique, à la pression de 38^{cm}, de manière que la pression totale soit assez inférieure à la pression atmosphérique. Ce qu'il faut montrer ici, c'est la présence de molécules des substances provenant de la décomposition du sulfure de carbone par la lumière. En ce moment vous ne voyez rien dans le tube; il continue encore à être, comme avant l'arrivée des vapeurs, optiquement transparent; mais vous voyez apparaître graduellement un nuage d'un bleu exquis. C'est le *ciel bleu* de Tyndall (1). Vous le voyez maintenant. Je prends un prisme de Nicol, et en regardant au travers, je reconnais que la lumière azurée émise par les vapeurs dans toute direction perpendiculaire au faisceau lumineux excitateur est polarisée dans le plan passant par mon œil et le faisceau. Elle est constituée par des vibrations lumineuses qui se font dans une direction déterminée, et cette direction doit être perpendiculaire au plan de polarisation; le professeur Stokes a démontré ce fait d'une manière qui, à mon avis, ne laisse subsister aucun doute, en discutant ce phénomène de la polarisation (2) qu'il a observé au moyen de dispositions expérimentales variées, permettant d'avoir de très petites particules solides ou liquides en suspension dans un milieu transparent.

Ce que vous allez voir tout à l'heure, et ce que je vous ai

(1) Voir *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. XVI, p. 491.

(2) Extrait du Mémoire du Professeur Stokes *On the Change of Refrangibi-*

dit avoir vu à travers le prisme de Nicol, est dû à ce que je pourrais appeler des ondes lumineuses secondaires ou dérivées; ces ondes sont renvoyées dans toutes les directions par de très petites sphérules liquides qui se sont condensées à la suite de la décomposition chimique déterminée par le faisceau lumineux dans la matière contenue dans le tube,

---

lity of Light, lu devant la Société Royale, le 27 mai 1852, et publié dans les *Transactions* à cette date :

« § 183. — Ce résultat me paraît étroitement lié avec la question de la direction des vibrations dans la lumière polarisée. Aussi longtemps que les particules en suspension sont grandes par rapport aux longueurs d'onde, la réflexion se fait sur elles comme sur une portion de la surface d'un solide de grandes dimensions immergé dans le liquide, et on ne peut en tirer, de manière ou d'autre, aucune conclusion. Mais, si les diamètres des particules sont faibles en comparaison des longueurs d'onde, il paraît évident que les vibrations dans un rayon réfléchi ne peuvent pas être perpendiculaires aux vibrations du rayon incident. Supposons pour le moment que, dans le cas des faisceaux observés actuellement, les particules en suspension soient faibles en comparaison de la longueur d'une onde lumineuse. L'observation a montré que le rayon réfléchi était polarisé. Mais tous les phénomènes présentés par un rayon polarisé dans un plan sont symétriques par rapport au plan de polarisation. Nous avons donc à choisir entre deux directions pour les vibrations du rayon réfléchi, à savoir la direction du rayon incident, et une autre perpendiculaire à la fois au rayon incident et au rayon réfléchi. La première serait nécessairement perpendiculaire à la direction des vibrations dans le rayon incident; nous sommes donc forcés de choisir la seconde, et de supposer par conséquent que les vibrations de la lumière polarisée dans un plan sont perpendiculaires au plan de polarisation, puisque l'expérience montre que le plan de polarisation de la lumière réfléchie est le plan de réflexion. D'après cette théorie, si nous décomposons les vibrations du rayon incident (horizontal) suivant deux directions, l'une horizontale, l'autre verticale, les composantes correspondront aux deux rayons, polarisés respectivement dans le plan de réflexion et dans le plan perpendiculaire, dans lesquels on peut supposer que le rayon incident est divisé; le premier de ces rayons est seul capable de fournir un... rayon réfléchi verticalement vers le haut (qui puisse entrer dans l'œil placé au-dessus de la ligne formée par le rayon incident, et regardant verticalement de haut en bas). Et, de fait, l'observation montre que, pour éteindre le faisceau diffusé, il suffit de polariser la lumière incidente dans un plan perpendiculaire au plan de réflexion, au lieu d'analyser la lumière réfléchie. »

Voir aussi deux Mémoires de Lord Rayleigh dans le *Philosophical Magazine*. J.-W. Strutt : *On the Light of the Sky, its Polarisation and Colour*. *On the Scattering of Light by small particles*, 1871; dans les *Annales de Chimie et de Physique*, 1891, le Mémoire de M. Wiener; dans les *Annales de l'École Normale*, la thèse ingénieuse de M. Carvallo, et dans les *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* de 1891 les Notes de MM. Cornu, Poincaré et Potier. (M. B.)

matière qui était entièrement gazeuse au moment où l'on a fait passer la lumière pour la première fois.

Pour comprendre ce que sont ces ondes dérivées, vous devez d'abord les regarder comme dues au mouvement de l'éther autour de chaque sphérule, la sphérule étant presque complètement immobile parce que sa densité est énorme relativement à celle de l'éther environnant. Le mouvement que communiquait à l'éther le faisceau lumineux excitateur seul, avant que les sphérules eussent pris naissance, peut être considéré comme se composant avec le mouvement de l'éther relativement à chaque sphérule, pour produire le mouvement résultant total dont l'éther est animé lorsque le faisceau lumineux chemine le long du tube et qu'on voit la lumière azurée qu'il émet latéralement. Ce second mouvement composant est évidemment identique au mouvement total que prendrait l'éther si, la lumière excitatrice étant supprimée, chacune des sphérules exécutait des vibrations d'amplitude égale, mais de direction opposée à celle des vibrations déterminées par la lumière excitatrice dans l'éther qui occupait la place de la sphérule avant qu'elle eût pris naissance.

Supposons donc, pour un moment, qu'il n'y ait pas d'excitation lumineuse et qu'un grand nombre de petites sphérules soient animées de vibrations de très faible amplitude parallèlement à une ligne (1). Si vous placez l'œil dans le plan passant

(1) L'étude dynamique du sujet, et particulièrement celle du mouvement communiqué à l'éther qui environne une seule sphérule lorsque cette sphérule exécute des vibrations parallèlement à une ligne droite, est indiquée dans les §§ *a* et *d* de la question suivante proposée au dernier examen de Cambridge pour le prix Smith (*Cambridge University Calendar for* 1883, numéro du mardi 30 janvier) :

« *a*. En partant de ce phénomène connu, à savoir que la lumière bleue d'un ciel sans nuages, examinée dans une direction perpendiculaire à celle du Soleil, est polarisée presque complètement dans le plan qui contient le Soleil, et en supposant que cette lumière est due à des particules de matière, petites par rapport à la longueur d'onde de la lumière, prouver que la direction des vibrations de la lumière polarisée rectilignement est perpendiculaire au plan de polarisation.

» *b*. Montrer que les équations du mouvement d'un solide élastique isotrope et

par l'axe du tube et perpendiculaire à cette ligne, vous verrez que toutes les parties du tube émettent de la lumière; cette lumière sera constituée par des vibrations parallèles à la ligne considérée. Si vous placez l'œil *sur* la ligne de vibration de l'une des sphérules situées vers le milieu du tube, vous ne verrez pas de lumière dans cette direction; mais si, laissant l'œil dans la même position, vous regardez obliquement vers l'une des extrémités du tube, vous verrez de la lumière qui s'évanouira quand vous ramènerez votre regard de l'extrémité au milieu. Donc, si le faisceau excitateur est polarisé rectilignement, c'est-à-dire si les vibrations de la lumière qui le compose sont parallèles à une ligne droite, et si l'on regarde le tube dans la direction perpendiculaire à la fois à cette ligne et à l'axe du tube, on voit la lumière dont les vibrations

---

homogène de densité égale à l'unité sont :

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} = \left(k + \frac{1}{3}n\right)\frac{\partial\delta}{\partial x} + n\,\Delta\alpha,$$

$$\frac{d^2\beta}{dt^2} = \left(k + \frac{1}{3}n\right)\frac{\partial\delta}{\partial y} + n\,\Delta\beta,$$

$$\frac{d^2\gamma}{dt^2} = \left(k + \frac{1}{3}n\right)\frac{\partial\delta}{\partial z} + n\,\Delta\gamma,$$

où k représente le module de résistance à la compression, n le module de rigidité, α, β, γ les composantes du déplacement au point (x, y, z) et à l'instant t, et

$$\delta = \frac{\partial\alpha}{\partial x} + \frac{\partial\beta}{\partial y} + \frac{\partial\gamma}{\partial z},$$

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

» *c*. Montrer que toutes les solutions possibles sont comprises dans la suivante

$$\alpha = \frac{\partial\Phi}{\partial x} + u, \qquad \beta = \frac{\partial\Phi}{\partial y} + v, \qquad \gamma = \frac{\partial\Phi}{\partial z} + w,$$

où u, v, w sont tels que

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0.$$

» Trouver les équations différentielles qui déterminent Φ, u, v, w. Trouver les vitesses des ondes respectives pour la solution Φ et pour les solutions u, v, w.

» *d*. Démontrer que les expressions suivantes sont des solutions, et interpréter

sont parallèles à cette ligne. Mais si l'on regarde le tube dans une direction parallèle à cette ligne, on ne voit pas de lumière; la ligne le long de laquelle on ne voit pas de lumière est la direction des vibrations dans le faisceau excitateur; cette direction, vous le voyez maintenant, est perpendiculaire à ce qu'en termes techniques on appelle le *plan de polarisation de la lumière*. Voici donc *l'experimentum crucis* de Stokes, expérience par laquelle il a répondu, d'une manière qui me paraît concluante, à cette question depuis longtemps débattue : La vibration se fait-elle *perpendiculairement* au plan de vibration ou *dans* ce plan? Pour vous montrer cette expérience, au lieu de prendre comme précédemment un faisceau de lumière naturelle, de regarder avec un petit prisme de Nicol et de vous dire ce que j'ai vu, je vais placer ce grand prisme

---

chacune d'elles pour des valeurs de $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ très grandes par rapport à λ (la longueur d'onde)

Lord Kelvin

(1) Ondes de condensation isotropes (longitudinales).

$$\alpha = \frac{\partial \Phi}{\partial x}, \qquad \beta = \frac{\partial \Phi}{\partial y}, \qquad \gamma = \frac{\partial \Phi}{\partial z},$$

où

$$\Phi = \frac{1}{r} \sin \frac{2\pi}{\lambda} \left(r - t\sqrt{k + \frac{4}{3} n} \right);$$

(2) Ondes de rotation autour de Ox (transversales).

$$\alpha = 0, \qquad \beta = -\frac{\partial \Psi}{\partial z}, \qquad \gamma = \frac{\partial \Psi}{\partial y},$$

où

$$\Psi = \frac{1}{r} \sin \frac{2\pi}{\lambda} (r - t\sqrt{n});$$

Le déplacement, indépendant de l'azimut, est perpendiculaire au plan méridien, maximum à l'équateur, nul aux pôles. Au centre, il se réduit à une rotation alternative autour de l'axe Ox.

(3) Ondes de rotation sans condensation (transversales).

$$\alpha = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \Psi + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2},$$

$$\beta = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x \, \partial y}, \qquad \gamma = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x \, \partial z}.$$

Le déplacement, indépendant de l'azimut, situé dans le plan méridien, n'est perpendiculaire au rayon que dans le plan de l'équateur; le déplacement, de plus en plus oblique, a lieu suivant le rayon en sens inverse aux deux pôles; au centre, il se réduit à un va-et-vient périodique suivant l'axe.

Lord Kelvin et M. B.

de Nicol sur le trajet du faisceau lumineux avant son entrée dans le tube; c'est ce que je fais en ce moment. Je tourne maintenant le prisme de Nicol dans différentes directions et je tourne l'appareil autour de son pied, de telle façon que, de tous les points de l'amphithéâtre, on puisse apercevoir le tube dans la direction qui correspond aux phénomènes successifs de *lumière* et *absence de lumière*. Ce que vous voyez répond exactement à la description que je vous ai faite tout à l'heure. Si vous aviez tous à la main un prisme de Nicol, vous reconnaîtriez que lorsque vous voyez parfaitement la lumière, le plan de polarisation passe par votre œil et l'axe du tube; vous avez maintenant bien compris, je l'espère, cette preuve de la perpendicularité de la direction des vibrations et du plan de polarisation.

Il faut maintenant que je vous fasse connaître une chose que m'a indiquée il y a longtemps le professeur Stokes; tous les ans je lui ai demandé instamment de la publier, mais il ne l'a pas fait; aussi l'ai-je prié de me permettre de vous en parler ce soir. C'est une explication dynamique de ce merveilleux phénomène appelé *phosphorescence* ou *fluorescence*. Le principe en est représenté dans cette disposition mécanique (décrite ci-dessous et dessinée dans la *fig*. 35, p. 103). Ma main, comme vous le voyez, entretient dans la barre la plus élevée un simple mouvement harmonique d'une période de quatre secondes environ. Vous voyez qu'un mouvement ondulatoire régulier se propage en descendant le long de la ligne de molécules représentée par ces disques circulaires fixés aux extrémités des barres; l'énergie, continuellement fournie par ma main à la barre supérieure, est constamment employée à échauffer le bassin de mélasse et d'eau placé au pied de l'appareil. J'éloigne maintenant ma main et j'abandonne tout le système à lui-même. La quantité très considérable d'énergie cinétique et d'énergie potentielle des grosses masses de plomb et des ressorts à boudin attachés à la barre supérieure se dépense graduellement en envoyant vers le bas de la ligne une suite d'ondes d'amplitude décroissante, et se convertit finalement en chaleur dans la mélasse et dans l'eau. Vous voyez qu'il s'est perdu, dans une demi-minute, la moitié

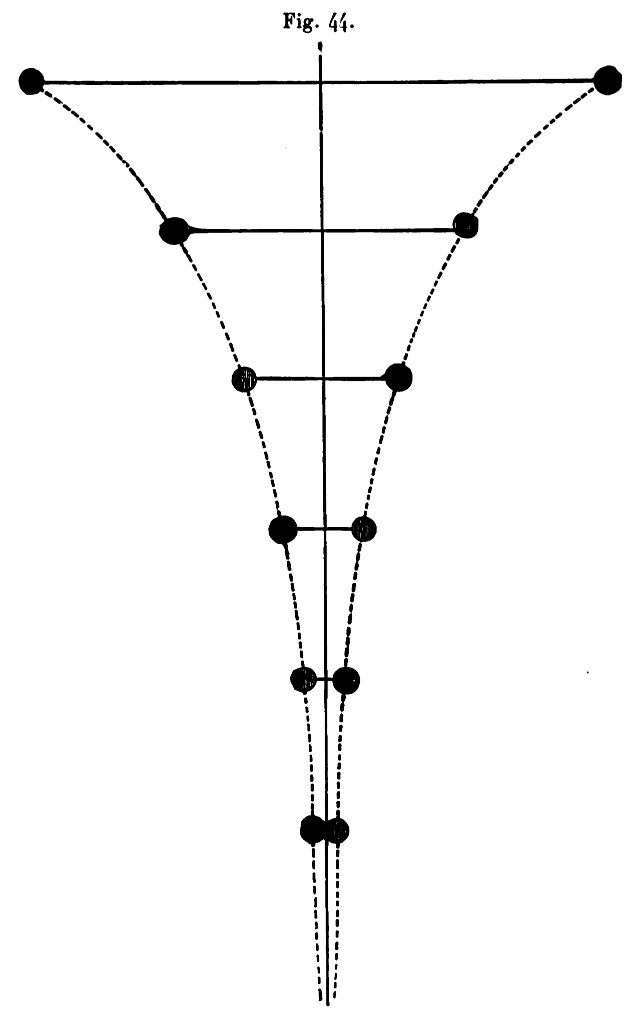
environ de l'amplitude de la vibration et, par conséquent, les trois quarts de l'énergie.

Vous allez voir combien le résultat est différent si j'accélère l'oscillation. L'oscillation rapide que j'imprime maintenant à la barre supérieure (sa période a été réduite à une seconde et demie environ) est incapable d'engendrer des ondes cheminant le long de la ligne de molécules; c'est cette oscillation rapide des molécules qui, d'après Stokes, constitue la lumière latente ou en réserve (voyez *fig.* 44). Remarquez maintenant que si j'éloigne ma main de la barre supérieure, il n'y a pas d'énergie dépensée dans la mélasse, puisqu'il n'y a pas d'ondes descendant le long de la ligne; et la vibration continue indéfiniment (ou, plus exactement, continue pendant une minute peut-être) comme vous le voyez; *il n'y a pas de perte* d'amplitude (ou, pour mettre mon langage tout à fait d'accord avec la réalité, laissez-moi dire que la perte est à peine sensible). Cet appareil mécanique fait très bien comprendre le principe dynamique de l'explication donnée par Stokes de la phosphorescence, ou mise en réserve de la lumière, telle qu'elle se produit dans les peintures lumineuses, bien connues aujourd'hui, dont vous voyez ici un spécimen, et dans le sulfure de calcium phosphorescent contenu dans ces tubes de verre que m'a obligeamment prêtés M. de la Rue. (L'expérience était montrée.)

Je vais maintenant vous montrer, à l'aide d'un morceau de verre d'urane, le phénomène nommé par Stokes *fluorescence*. Je place ce verre dans le faisceau lumineux émis par la lampe électrique et dispersé par le prisme, comme vous le voyez. Vous voyez que le verre d'urane devient visible quand il est illuminé par des rayons invisibles. Les rayons qui l'illuminent, même avant qu'il pénètre dans la partie visible du spectre, sont manifestement invisibles, du moins tant qu'on emploie, pour apprécier la visibilité, l'écran qui reçoit le spectre; le verre d'urane, en effet, et ma main qui le tient, ne jettent pas d'ombre sur l'écran. De même, vous voyez le verre d'urane que ma main expose aux rayons ultra-violets, tandis que vous ne voyez pas ma main. J'approche maintenant le verre de la région où vous voyez l'air (ou plutôt les poussières qu'il con-

tient) illuminé par la lumière violette : il n'y a encore pas

Fig. 44.



Dessin montrant les différentes amplitudes de vibration d'une rangée de molécules oscillant avec une période plus faible que leur plus petite période ondulatoire.

d'ombre sur l'écran, mais le verre d'urane que j'ai dans ma

main brille d'un éclat plus vif; la lumière verte qu'il émet a une composition très complexe; les ondes qui la constituent ont des périodes plus longues que celles de la lumière ultra-violette, et leur production dans le verre d'urane est déterminée par la lumière incidente, dont la période est plus courte que celle de la lumière violette. Cette lumière est complètement dépourvue de polarisation. C'est le défaut absolu de polarisation, et le fait que ses longueurs d'onde sont toujours supérieures à celle de la lumière excitatrice, qui a conduit Stokes à distinguer cette illumination du verre d'urane, de la simple illumination moléculaire (1) (donnant lieu à de la lumière toujours polarisée partiellement sinon complètement, et ayant toujours même longueur d'onde que la lumière excitatrice) que nous avons considérée précédemment dans l'expérience du Dr Tyndall.

Stokes donna le nom de *fluorescence* à l'émission d'une lumière de période plus grande que celle de la lumière excitatrice, parce qu'on l'a observée dans le spath fluor, et qu'il désirait éviter toute hypothèse dans le choix d'un nom. Il indiqua sa grande ressemblance avec le phénomène de la phosphorescence, connu depuis longtemps; mais il trouva entre ces deux phénomènes des contrastes apparents, qui

---

(1) Le phénomène se produit d'une manière très belle avec le sulfate de quinine. Une expérience intéressante consiste à écrire sur un écran de papier blanc avec le doigt, ou un pinceau, trempé dans une dissolution de sulfate de quinine. Les traits sont tout à fait invisibles dans la lumière ordinaire; mais si l'on projette sur l'écran un spectre dont la portion ultra-violette invisible couvre la région sur laquelle on a écrit avec le sulfate de quinine, les caractères apparaissent et émettent une lumière bleuâtre, l'obscurité régnant autour d'eux. Le phénomène présenté par le sulfate de quinine et par un grand nombre d'autres solutions végétales, ainsi que par quelques minéraux, comme par exemple la fluorine, et par divers verres d'ornement, comme le verre jaune de Bohême appelé dans le commerce *canary glass* (qui diffuse une lumière verdâtre), a été découvert par Sir David Brewster (*Transactions Royal Society of Edinburgh*, 1838, et *British Association, Newcastle*, 1838); il a été étudié aussi par Sir John Herschel, qui l'a nommé *diffusion épipolique* (*Phil. Trans.*, 1845). Une analyse expérimentale complète du phénomène, montrant en quoi consistait ce qu'avaient vu les premiers observateurs, et expliquant bien des phénomènes singuliers et mystérieux qu'ils avaient remarqués, a été faite par Stokes, et décrite dans son Mémoire *On the Change of Refrangibility of Light* (*Phil. Trans.*, 27 mai 1852).

l'empêchèrent de conclure que la fluorescence est, en réalité, un cas particulier de la phosphorescence.

Au cours de la comparaison entre les deux phénomènes (Sections 221 à 225 de son Mémoire de 1852) il s'exprime ainsi : « Mais le contraste de beaucoup le plus frappant entre les deux phénomènes consiste dans la soudaineté apparente du commencement et de la cessation de l'illumination dans le cas de la diffusion interne, lorsqu'on admet et que l'on supprime la lumière excitatrice. Rien ne peut faire soupçonner que l'effet ait une durée appréciable. La diffusion interne, lorsqu'on la détermine au moyen d'une étincelle électrique, ne paraît pas moins instantanée que l'illumination d'un paysage par la lueur soudaine de l'éclair. Je n'ai pas essayé de voir si l'on pourrait réussir à assigner au phénomène une durée appréciable par l'emploi d'un miroir tournant. » La recherche indiquée dans ce passage a été faite par Edmond Becquerel qui, grâce à ce beau et simple petit appareil, imaginé pour la circonstance, a répondu affirmativement à cette question : la fluorescence a-t-elle une durée appréciable? L'expérience est très intéressante, et je suis sûr que vous la verrez avec plaisir. L'appareil se compose d'une boîte circulaire plate munie de deux ouvertures percées en face l'une de l'autre dans les côtés plats, et près de la circonférence; à l'intérieur se trouvent deux disques, portés par un axe tournant rapidement, et qui masquent et démasquent alternativement les ouvertures; l'une des ouvertures est démasquée pendant que l'autre est masquée, et *vice versâ*. Un petit morceau de verre d'urane est fixé à l'intérieur de la boîte entre les deux ouvertures, et un faisceau de lumière électrique tombe sur l'une d'elles. On regarde l'autre.

Je fais tourner lentement l'axe, et vous ne voyez rien. En ce moment, la lumière tombe sur le verre d'urane à travers l'ouverture qui est de mon côté, mais vous ne voyez rien parce que l'ouverture placée en face de vous est bouchée; maintenant cette fenêtre est démasquée, mais vous ne voyez rien parce que l'ouverture par laquelle pénètre la lumière est masquée, et que la lueur du verre d'urane due à l'illumination précédente ne persiste pas d'une manière appréciable.

Cela s'accorde parfaitement avec ce que vous avez vu quand je tenais la grande plaque de verre d'urane dans la lumière ultra-violette du spectre du prisme. Aussi longtemps que j'y laissais le verre d'urane, vous le voyiez briller; au moment où je l'éloignais des rayons invisibles, il cessait de briller. Le *moment* que nous pouvions apprécier alors était peut-être $\frac{1}{10}$ de seconde. Si le verre d'urane avait continué à luire d'une manière sensible pendant $\frac{1}{20}$ ou $\frac{1}{50}$ de seconde, notre vue paresseuse nous aurait cependant fait croire à la disparition de la lueur au moment même où on enlevait le verre. Je tourne maintenant la roue assez vite pour que l'ouverture la plus voisine de vous s'ouvre $\frac{1}{50}$ de seconde environ après que le verre d'urane a été baigné de lumière; vous ne voyez encore rien. Je tourne de plus en plus vite, et il commence à briller quand l'ouverture qui vous fait face est démasquée environ $\frac{1}{200}$ de seconde après le passage de la lumière à travers l'autre ouverture. Je tourne encore plus vite, il émet une lueur de plus en plus vive, jusqu'à ce qu'il arrive à briller comme un charbon rouge; un nouvel accroissement de la vitesse n'amène, comme vous voyez, qu'une faible variation d'éclat.

Il semble donc que la fluorescence soit exactement la même chose que la phosphorescence; et nous devons nous attendre à ce qu'on découvre des substances établissant une liaison continue entre le verre d'urane, qui luit pendant quelques millièmes de seconde seulement, et les sulfures lumineux qui luisent pendant des heures, des jours ou des semaines après la cessation de l'excitation lumineuse.

J'ai gardé pour la fin de ma conférence la plus décisive et la plus caractéristique des méthodes d'évaluation de la grandeur des atomes, la méthode fondée sur la théorie cinétique des gaz. Voici un dessin (*fig.* 45) représentant une agglomération de molécules et montrant, à l'échelle de 1000000 pour 1, toutes les molécules d'air dont les centres peuvent se trouver à un moment quelconque dans une tranche à base carrée de $\frac{1}{10000}$ de centimètre de côté, et $\frac{1}{100000000}$ de centimètre d'épaisseur. Le côté du carré que vous voyez dans le dessin a 1 mètre de longueur, et représente $\frac{1}{10000}$ de centimètre. Le dessin vous montre juste 100 molécules, c'est-à-dire $\frac{1}{10000}$ du nombre

total (10^6) des particules contenues dans un cube de $\frac{1}{10\,000}$ de centimètre, ou toutes les molécules contenues dans une tranche ayant une épaisseur 10000 fois plus petite que celle du cube. Représentez-vous un cube rempli de particules semblables à ces billes de verre ([1]), répandues au hasard dans un espace égal à mille fois la somme de leurs volumes. Une pareille agglomération peut être réduite (comme un gaz peut être condensé) au millième de son volume, mais cette condensation amène les molécules au contact. On peut imaginer que la constitution de l'air atmosphérique, dans ses conditions ordinaires de densité, a quelque analogie avec cette agglomération. Le dessin (*fig.* 45), avec des molécules dont la grandeur, si on la représentait à l'échelle convenable, devrait être de 1^{mm} (c'est-à-dire trop faible pour que vous puissiez les apercevoir) pour figurer un diamètre réel de $\frac{1}{10\,000\,000}$ de centimètre, représente un gaz dans lequel une condensation de 1 à 10 en longueur ou de 1 à 1000 en volume amènerait les molécules tout près les unes des autres.

Vous pouvez maintenant imaginer que les particules se meuvent dans toutes les directions, chacune d'elles allant en ligne droite jusqu'à ce qu'elle en rencontre une autre. La longueur moyenne du libre parcours est de dix centimètres dans notre dessin, et représente en réalité $\frac{1}{100\,000}$ de centimètre. Pour réaliser le cas de l'air atmosphérique dans les conditions ordinaires de densité et de pression, il faut supposer que la vitesse réelle de chaque particule est 50000 centimètres par seconde, ce qui donne, pour la valeur moyenne de l'intervalle entre deux chocs, $\frac{1}{5\,000\,000\,000}$ de seconde.

([1]) L'appareil qu'on montrait en ce moment représentait les collisions qui ont lieu entre les molécules d'une matière gazeuse et la diffusion d'un gaz dans un autre. Il consistait dans une planche carrée de 1 mètre de côté environ, percée de 100 trous disposés sur 10 rangées de 10 trous. Par chacun des trous passait une corde de 5 mètres de longueur, à l'extrémité inférieure de laquelle était fixée une boule de verre coloré de 4^{cm} de diamètre; les boules de 5 rangées contiguës étaient rouges, les boules des 5 autres rangées étaient bleues. On tirait vers le dehors une boule de l'une des rangées extérieures, puis on l'abandonnait à elle-même; elle pénétrait parmi les autres, et provoquait des collisions dans toute l'étendue du plan contenant les boules.

L'heure est trop avancée pour que je puisse vous parler avec détails de cette belle théorie cinétique des gaz; mais je vous signalerai trois points sur lesquels ont porté les recherches de Maxwell et de Clausius, à savoir : la viscosité ou fluidité imparfaite des gaz; la diffusion des gaz les uns dans les autres, et la diffusion de la chaleur dans les gaz; les résultats de ces recherches, comparés entre eux, donnent une évaluation de la grandeur moyenne du libre parcours d'une molécule. Une belle théorie de Clausius nous permet de calculer, d'après la longueur du libre parcours moyen, la grandeur de l'atome. C'est ce qu'a fait Loschmidt (¹), et, en marchant sur ses traces sans m'en douter, je suis arrivé à la même conclu-

Fig. 45.

Dessin représentant le nombre de molécules contenues dans un volume dont la base est un carré de $\frac{1}{10\,000}$ de centimètre de côté, et dont l'épaisseur est $\frac{1}{100\,000\,000}$ de centimètre.

(¹) *Sitzungsberichte* de l'Académie de Vienne, 12 oct. 1865, p. 395.

sion que lui; c'est-à-dire que nous sommes arrivés à la certitude absolue que les dimensions d'une molécule d'air sont de l'ordre de celles que j'ai indiquées.

Les quatre ordres d'arguments que j'ai passés en revue conduisent tous essentiellement à la même évaluation des dimensions de la structure moléculaire. Ils concourent tous à établir, avec un degré de probabilité qui doit être considéré comme très grand, que dans un liquide ordinaire, dans un solide transparent, ou dans un solide opaque en apparence, la distance moyenne entre les centres des molécules voisines est inférieure à $\frac{1}{5\,000\,000}$ et supérieure à $\frac{1}{1\,000\,000\,000}$ de centimètre.

Pour concevoir la nature de la structure granulaire indiquée par cette conclusion, imaginez une sphère d'eau ou de gaz, de la grandeur d'un ballon de barette ([1]), qui serait agrandi jusqu'à avoir la dimension de la Terre, chacune des molécules qui la constituent étant amplifiée dans la même proportion. La sphère ainsi amplifiée aurait une structure intermédiaire, très probablement, entre celle d'un amas de grains de plomb et celle d'un amas de ballons de barette.

([1]) C'est-à-dire un globe de 16^{cm} de diamètre.



VI.

ACHEMINEMENT

VERS

UNE THÉORIE CINÉTIQUE DE LA MATIÈRE.

Discours d'ouverture prononcé devant la Section de Mathématiques et Physique de l'Association Britannique au Congrès de Montréal, 1884. (*Brit. Assoc. Report,* p. 613.)

La théorie cinétique des gaz. — Elle n'enseigne rien sur la molécule. — Difficulté que soulève la question des chocs entre les molécules. — Nécessité d'expliquer l'élasticité d'un corps solide. — Réalisation, au moyen de matériaux dépourvus d'élasticité, d'un milieu élastique et doué du pouvoir rotatoire magnétique : systèmes girostatiques. — Actions à distance entre des particules solides, réalisées au moyen du mouvement d'un liquide. — Circulations sans rotation autour de noyaux solides perforés. — Circulations sans noyaux solides. — Théorie tourbillonnaire des gaz.

La théorie cinétique des gaz, bien connue aujourd'hui, constitue un si grand pas dans la voie qui conduit à expliquer par le mouvement des propriétés en apparence statiques de la matière, qu'on peut difficilement s'empêcher de pressentir la création d'une théorie complète de la matière, dans laquelle toutes ses propriétés apparaîtront comme de simples attributs du mouvement. Si nous voulons rechercher l'origine de cette idée, il faut remonter à Démocrite, Épicure et Lucrèce. Nous pouvons ensuite passer 1800 ans sans rencontrer, je crois, le moindre progrès. Au commencement du siècle dernier, nous trouvons dans la *Recherche de la Vérité*, de Malebranche, cette affirmation que la *dureté des corps* est due à de *petits*

tourbillons (¹). Ces mots sont noyés dans le fatras désespérant des énoncés inintelligibles de la philosophie physique, métaphysique et théologique de l'époque, et en aucun autre endroit des trois volumes de ce grand Ouvrage, on ne découvre d'explication, d'éclaircissement ou d'exemple d'aucune sorte qui vienne les confirmer; leur sens n'est qu'obscurci par quelques phrases ou quelques mots isolés rencontrés çà et là; cependant ils expriment une conception nette, qui constitue un pas remarquable vers la théorie cinétique de la matière. Un peu plus tard, Daniel Bernoulli met au jour ce que nous acceptons aujourd'hui comme l'article le plus certain de la foi scientifique, la théorie cinétique des gaz. Bernoulli, autant que je sache, pensait seulement à la loi de Boyle et de Mariotte, relative au *ressort de l'air* (²), comme disait Boyle; il n'avait pas égard aux variations de la température, ni à l'accroissement de la pression d'un gaz que l'on échauffe en l'empêchant de se dilater, phénomène qu'il connaissait à peine peut-être; encore moins s'occupait-il de l'élévation de température due à la compression et de l'abaissement de température dû à la dilatation, et de la nécessité qui en résulte d'attendre une fraction de seconde ou quelques secondes (avec les appareils servant aux expériences ordinaires), pour voir la variation de pression, d'abord trop grande, retomber à la valeur qui vérifie la loi de Boyle. Le rapprochement établi il y a quarante ans par Joule entre ces phénomènes et la conception originale de Bernoulli constitua la base de la théorie cinétique des gaz telle que nous la possédons aujourd'hui. Mais quel splendide et utile édifice Clausius et Maxwell ont élevé sur cette base! Et de quel bel ornement Crookes en a décoré le faîte avec son radiomètre, qui s'y rattache solidement grâce à cette heureuse

---

(¹) « Preuve de la supposition que j'ay faite : que la lumière subtile ou éthérée est nécessairement composée de PETITS TOURBILLONS; et qu'ils sont les causes naturelles de tous changements qui arrivent à la matière; ce que je confirme par l'explication des effets les plus généraux de la Physique, tels que sont la dureté des corps, leur fluidité, leur pesanteur, leur légèreté, la lumière, réfraction et réflexion de ses rayons. » (MALEBRANCHE, *Recherche de la Vérité*; 1712.)

(²) Spring of air.

découverte de Tait et Dewar [1], que la longueur du libre parcours des molécules d'air résiduelles dans un bon vide moderne peut atteindre plusieurs centimètres! Les explications données par Clausius et Maxwell de la diffusion des gaz, leur conclusion si charmante par sa clarté, que dans les gaz la diffusion de la chaleur est à peine un peu plus rapide que la diffusion des molécules à cause des échanges d'énergie dans les collisions entre molécules [2], alors que la transmission

---

(1) *Proc. R. S. E.*, 2 mars 1874 et 5 juillet 1875.

(2) D'autre part dans les liquides, à cause de l'agglomération des molécules, la diffusion de la chaleur doit se faire surtout par des échanges d'énergie entre les molécules, et doit être, comme l'expérience le montre, incomparablement plus rapide que la diffusion des molécules elles-mêmes; elle doit de plus être beaucoup moins rapide que la diffusion, soit de la matière, soit de la chaleur dans les gaz. Ainsi, d'après Fick, la diffusibilité du sel marin dans l'eau n'est que de $0^{cq},0000116$ par seconde : c'est par un nombre près de 200 fois plus grand qu'est exprimée la diffusibilité de la chaleur dans l'eau, que J.-T. Bottomley a trouvée égale à $0^{cq},002$ par seconde à peu près. Les diffusibilités des gaz les uns dans les autres sont comprises, d'après les expériences de Loschmidt, entre 0,098 (diffusibilité de l'acide carbonique dans le protoxyde d'azote) et 0,642 (diffusibilité de l'acide carbonique dans l'hydrogène); tandis que les diffusibilités thermiques des gaz, calculées d'après la théorie cinétique des gaz de Clausius et Maxwell, sont de 0,089 pour l'acide carbonique, 0,16 pour l'air ordinaire et les autres gaz ayant à peu près la même densité, et 1,12 pour l'hydrogène (toutes ces diffusibilités, qu'il s'agisse de la matière ou de la chaleur, étant évaluées en centimètres carrés par seconde). (W. T.).

Voici la signification de ces diffusibilités : le milieu considéré est supposé limité par deux plans parallèles maintenus dans des conditions invariables. Pour la diffusion d'un sel dans un liquide, ces conditions sont la saturation d'un côté, et la pureté du dissolvant, ou concentration zéro, de l'autre (expériences de Fick). Si u désigne la concentration (ou masse de sel contenue dans l'unité de volume du liquide) à une distance x du plan origine, on montre que la quantité de sel qui traverse dans le temps dt l'unité de surface du plan x est $-k\frac{\partial u}{\partial x}dt$. La quantité qui traverse l'unité de surface du plan $x+dx$ dans le même temps est $-k\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}dx\right)dt$; le poids de sel contenu dans le cylindre de base 1 limité par les deux plans s'accroît donc, dans le temps dt, de $k\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}dx\,dt$. Cette quantité pouvant se représenter par $\frac{\partial u}{\partial t}dx\,dt$, on a

$$\frac{\partial u}{\partial t}=k\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}. \tag{1}$$

Le coefficient k est la quantité de sel qui, dans l'état stationnaire, doit traverser

de la chaleur se fait principalement par le transport des molécules elles-mêmes, et l'explication donnée par Maxwell de la viscosité des gaz, ainsi que les relations numériques absolues que les travaux de ces deux grands découvreurs ont établies entre les trois propriétés de la diffusion, de la conductibilité thermique et de la viscosité, ont ajouté au domaine de la Science une vaste province qui va s'accroissant toujours.

En dépit de sa richesse en résultats pratiques, la théorie cinétique des gaz, telle qu'elle a été développée jusqu'à présent, s'arrête court à l'atome ou à la molécule, et ne suggère pas même une idée qui puisse conduire à l'explication des propriétés en vertu desquelles les atomes ou les molécules s'influencent mutuellement. Pour trouver de quoi nous guider vers une théorie de la matière plus profonde et plus compréhensive, nous pouvons avec avantage remonter à la fin du siècle dernier et au commencement de celui-ci, et nous adresser à la conclusion de Rumford relative à la chaleur engendrée par le forage d'un canon de bronze : « Il me semble extrêmement difficile, sinon tout à fait impossible, de conce-

---

normalement pendant l'unité de temps deux faces opposées d'un cube de volume 1 pour maintenir entre celles-ci une différence de concentration égale à 1. Les dimensions de u (masse par unité de volume) sont ML^{-3}: les dimensions de k sont donc définies par la relation

$$ML^{-2}T^{-1} = (k)ML^{-4},$$
$$(k) = L^2T^{-1};$$

k est exprimé en centimètres carrés par seconde.

Pour les gaz, on est conduit encore à l'équation (1), en désignant par u la pression de l'un des gaz; le coefficient de diffusion est alors la quantité de ce gaz qui doit traverser deux faces opposées d'un cube de volume 1 pour maintenir entre elles une différence de pression de l'un des gaz égale à $+1$ et, de l'autre, égale à -1 (la somme des pressions doit en effet être constamment la même). Les dimensions de k sont toujours L^2T^{-1}.

Quant à la diffusion de la chaleur, c'est encore l'équation (1) qui définit k, u désignant la température; k représente le rapport de la quantité de chaleur qui doit traverser par unité de temps les faces opposées d'un cube de volume 1, pour maintenir entre ses deux bases une différence de température de 1°, à la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1° la température de l'unité de volume de la substance étudiée. — Ses dimensions sont encore L^2T^{-1}.

voir une idée claire d'une chose qui serait susceptible d'être engendrée et communiquée comme la chaleur a été engendrée et communiquée dans ces expériences, et qui ne serait pas le *mouvement* (¹) ». Plus suggestives encore sont ces paroles de Davy : « L'existence des phénomènes de répulsion ne dépend pas d'un fluide élastique particulier.... La chaleur peut être définie comme un mouvement particulier, probablement une vibration des corpuscules des corps qui tend à les séparer.... Pour distinguer ce mouvement des autres, et désigner les causes de nos sensations de chaleur, etc., on a adopté le nom de *mouvement répulsif* (²) ». C'est là une idée très importante. Il y aurait quelque hardiesse de langage à dire que la Terre et la Lune sont maintenues éloignées l'une de l'autre par un mouvement répulsif; et cependant, après tout, qu'est-ce que la force centrifuge, sinon un mouvement répulsif? et n'est-il pas possible que rien de semblable à une répulsion n'existe, et que ce que nous prenons pour des répulsions soit dû à l'inertie seule? Deux corps se meuvent l'un vers l'autre, et leur mouvement est accéléré par leur attraction mutuelle; s'ils ne se rencontrent pas exactement, ils ne peuvent que se séparer en vertu de l'inertie de leurs masses. Ainsi, après s'être frôlés en décrivant des courbes fortement concaves autour de leur centre de gravité commun, ils se séparent de nouveau. Un observateur peu attentif pourrait croire qu'ils se sont repoussés l'un l'autre, et ne pas remarquer de différence entre ce qu'il voit réellement et ce qu'il verrait si les deux corps avaient été lancés l'un vers l'autre avec une grande vitesse, et s'étaient séparés ensuite, soit en rebondissant après le choc, soit en décrivant des courbes continues fortement convexes, en vertu d'une répulsion mutuelle.

Joule, Clausius et Maxwell, et sans doute Daniel Bernoulli lui-même, et aussi je crois, tous ceux dont les écrits ou les travaux sur la théorie cinétique des gaz ne présentent pas

---

(¹) *Œuvres du comte Rumford*, t. I, p. 90, publiées par l'*American Academy of Arts and Sciences*, Boston; 1870.

(²) *Essay on Heat, Light and the Combinations of Light* (Œuvres complètes de Sir Humphry Davy, t. II, p. 10, 14 et 20).

d'ambiguïté, ont considéré comme répulsive l'action mutuelle des molécules au moment de la collision. Ne pourrait-elle, après tout, être attractive? Cette idée n'a jamais abandonné mon esprit depuis que j'ai lu pour la première fois *Repulsive Motion* de Davy, il y a environ trente-cinq ans; mais je n'en ai jamais tiré parti, du moins jusqu'à aujourd'hui (16 juin 1884), si ce mot peut s'appliquer à ce que je vais dire; en effet, en préparant ce discours, j'ai remarqué que les anciennes expériences de Joule et celles que j'ai faites moi-même sur l'effet thermique de la détente des gaz s'échappant d'un réservoir à haute pression à travers un tampon poreux (1) prouvent que le gaz le moins dense a une énergie *potentielle* intrinsèque supérieure à celle du gaz le plus dense, si l'on adopte l'hypothèse ordinaire sur la température d'un gaz, hypothèse d'après laquelle deux gaz sont à la même température quand les énergies cinétiques de leurs molécules constitutives ont une même valeur moyenne par molécule (2).

Réfléchissez donc à ceci. Imaginez une grande quantité de particules enfermées dans une enceinte limitée par une surface qui peut être poussée vers l'intérieur à volonté en tous les points de son étendue. Disposez maintenant tout autour de l'enceinte un corps de troupes du génie de l'armée des démons distributeurs de Maxwell, en leur donnant l'ordre de refouler activement la surface vers l'intérieur en tout point quand aucune des troupes assiégées n'en sera proche, et de

---

(1) Ces expériences ont été publiées de nouveau dans les *Mathematical and Physical Papers* de Sir W. Thomson, t. I, art. XLIX, p. 381; *voir* aussi la collection des *Mémoires de Joule*, t. II, p. 216, et VERDET, *Th. méc. de la chaleur*, t. I.

(2) Ce n'est là qu'une hypothèse; les fondateurs de la théorie cinétique des gaz l'ont eux-mêmes à peine remarqué, et presque aucun de ceux qui ont écrit sur ce sujet ne l'a remarqué davantage. Personne n'a encore examiné cette question : quelle est, relativement à la distribution moyenne de l'énergie cinétique, la condition finale remplie par deux portions de matière gazeuse séparées par une mince cloison élastique qui empêche absolument la diffusion de la matière, tandis qu'elle permet les échanges d'énergie grâce aux chocs qu'elle reçoit ? A la vérité, je ne sais pas si l'énoncé que je donne ici n'est pas le premier qui ait jamais été publié au sujet de cette condition du problème de l'égalité de température de deux masses gazeuses. (W. T.)

rester en repos quand ils les verront approcher, et jusqu'au moment où elles seront retournées vers l'intérieur (¹). Le résultat sera le suivant: avec la même somme d'énergie cinétique et d'énergie potentielle pour le même nombre de particules ainsi emprisonnées, la masse sera devenue plus dense. Eh bien, les anciennes expériences de Joule sur l'écoulement de l'air, ainsi que les miennes, montrent que si la masse est constituée par de l'air ordinaire, de l'oxygène, de l'azote ou de l'acide carbonique, la température est un peu plus élevée dans le cas où la densité est plus grande, que dans le cas où elle est plus petite, lorsque les énergies totales sont les mêmes. D'après l'hypothèse, l'égalité de température entre deux gaz différents ou deux portions d'un même gaz ayant des densités différentes correspond à l'égalité des quantités d'énergie cinétique réparties dans un même nombre de molécules des deux masses. Nos observations prouvant que la température est plus élevée dans la masse condensée, il s'ensuit que l'énergie potentielle y est plus faible. Ceci (toujours, bien entendu, en admettant l'hypothèse relative à la température) prouve qu'il s'exerce une certaine attraction entre les molécules, mais ne prouve pas qu'il y ait une attraction finale entre deux molécules qui se heurtent, ou dont la distance est bien inférieure à la distance moyenne des molécules les plus voisines dans la masse. La force au moment du choc pourrait être répulsive, comme on l'a généralement supposé jusqu'ici, et cependant l'attraction pourrait prédominer dans le compte total de la différence entre les énergies potentielles intrinsèques de la masse la plus dense et de la moins dense. Cependant, il est à remarquer que l'explication de la propagation du son dans les gaz, et même celle de la pression qu'un gaz, en vertu de sa fluidité, exerce contre les parois du vase qui le contient, sont, d'après la théorie cinétique des gaz, tout à fait indépendantes de la nature, soit attractive, soit répulsive, de

(¹) De cette façon on réduit le volume sans appliquer aucun travail extérieur au gaz, mais cela suppose précisément que l'on puisse trouver à chaque instant des régions de la surface ou au moins des points de la paroi solide, sur lesquelles l'action exercée par les molécules mobiles soit nulle. Les démons de Maxwell n'ont à fournir que le travail interne de déformation de la paroi. (M. B.)



la force finale au moment du choc. Naturellement, il doit être entendu que, si elle est attractive, les particules doivent être assez petites pour se rencontrer toujours difficilement (elles devraient être infiniment petites pour ne se rencontrer *jamais*), et qu'en réalité elles se rencontrent assez rarement, eu égard au nombre de fois que leur parcours est dévié d'un grand angle par l'attraction, pour que l'influence de ces collisions purement attractives l'emporte sur celle des impulsions comparativement très rares dues à un contact réel. Ainsi, après tout, les spéculations auxquelles *Repulsive Motion* de Davy ouvre la voie, ne nous permettent pas de rejeter complètement cette idée d'une répulsion réelle; elles ne font que nous autoriser à dire qu'elle n'a pas d'importance; et nous ne pouvons pas même le dire avec certitude, parce que, s'il y a des chocs, on ne peut pas éviter, quand on essaie de donner quelque réalité à une conception de la théorie cinétique des gaz, de s'occuper de la nature de la force pendant le choc, et des effets des impulsions mutuelles, quelque rares qu'elles soient. Et de fait, à moins de se contenter de considérer les atomes d'un gaz comme des points doués d'inertie et, comme le suppose Boscovich, doués de forces d'attraction mutuelle positives ou négatives, variables suivant une fonction déterminée de la distance, on ne peut éviter la question des chocs, et des vibrations et des rotations des molécules dues à ces chocs; on doit considérer chaque molécule séparément comme étant, soit un petit solide élastique, soit un mode particulier de mouvement dans un liquide continu répandu partout. Pour moi, je ne vois pas comment nous pourrions nous arrêter avant d'être arrivés à nous convaincre de la vérité de cette dernière hypothèse; mais dans notre marche vers la vérité, nous aurions atteint une halte temporaire très agréable, si nous pouvions, pour ainsi dire, construire un modèle mécanique de gaz au moyen de petits morceaux ronds d'une matière solide parfaitement élastique, mobiles en tous sens à travers l'espace occupé par le gaz, se heurtant les uns les autres, et heurtant les parois du vase qui les contient. C'est à la vérité tout ce que nous avons jusqu'à présent en fait de théorie cinétique des gaz, et entre les mains de Clausius et de Maxwell

tout cela s'est transformé pour nous dans ces grands résultats qui constituent notre premier pas vers une théorie cinétique de la matière. Naturellement, nous devrions partir de là pour trouver une explication de l'élasticité et de toutes les autres propriétés des molécules elles-mêmes. C'est là un sujet bien plus complexe et bien plus difficile à traiter que les propriétés des gaz, que nous expliquons en supposant la molécule élastique; mais, sans expliquer les propriétés de la molécule elle-même, nous pouvons, en supposant simplement cette molécule douée des propriétés requises, nous arrêter un instant et contempler avec satisfaction la théorie cinétique des gaz et l'explication qu'elle donne des propriétés gazeuses, explication qui n'est pas seulement un pas d'une extrême importance vers une théorie plus pénétrante de la matière, mais qui est sans nul doute l'expression d'un groupe de faits naturels parfaitement intelligibles et parfaitement définis.

[Mais, hélas! il faut renoncer à notre modèle mécanique composé d'une nuée de petits solides élastiques se mouvant en tous sens les uns parmi les autres. Bien que chaque particule ait une élasticité absolument parfaite, le résultat serait à peu près le même que si elle était imparfaitement élastique. L'effet moyen de collisions sans cesse répétées serait de convertir graduellement toute l'énergie de translation en énergie vibratoire due à des vibrations de la molécule ayant une période de plus en plus courte. Il paraît certain que chaque choc doit abandonner aux vibrations de portions limitées par des lignes nodales très resserrées un peu plus d'énergie qu'il n'y en avait avant le choc dans des vibrations de cette sorte. Plus cette subdivision nodale est fine, moins doit être grande la tendance à abandonner de l'énergie vibratoire sous forme d'énergie de translation au cours d'une collision; et je crois qu'on peut démontrer rigoureusement que toute l'énergie de translation doit se transformer finalement en énergie vibratoire, chaque molécule offrant des divisions nodales de plus en plus resserrées, si cette molécule est un solide élastique. Laissons donc sans solution, pour quelque temps, cette difficulté que soulève la théorie cinétique des gaz; mais conservons l'espoir que nous pourrons y revenir, ou que d'autres le

pourront après nous, munis d'une connaissance plus parfaite des propriétés de la matière ainsi que d'armes mathématiques plus pénétrantes et capables d'ouvrir une brèche dans la barrière qui nous cache aujourd'hui la molécule, et nous empêche de concevoir les effets qu'elle éprouve pendant le choc, en dehors de la simple altération du mouvement de translation (¹)].

Expliquer l'élasticité d'un gaz, tel était primitivement le but de la théorie cinétique des gaz. Ce but ne peut être atteint qu'en admettant l'existence d'une élasticité plus complexe encore et plus difficile à expliquer que celle des gaz, l'élasticité d'un solide. Donc, même si le défaut fatal que je signalais à l'instant dans la théorie ne s'y trouvait pas, et si nous pouvions être complètement satisfaits par la théorie cinétique des gaz fondée sur les collisions de molécules solides et élastiques, nous devrions aller plus loin et poursuivre l'édification d'une théorie plus vaste expliquant l'élasticité des solides; et il ne faut pas croire que ce soit là un but chimérique de l'ambition scientifique. Mais, au moment de porter notre attention sur une telle théorie, nous pourrions être arrêtés par cette question insidieuse : qu'entendez-vous par expliquer une propriété de la matière? Quant à me laisser arrêter par une telle question, tout ce que je puis dire, c'est que si toute la Science physique devait consister dans l'art de l'ingénieur, et ne pas dépasser cet art, nous devrions forcément nous contenter de découvrir par l'observation les propriétés de la matière, et de nous en servir pour les besoins de la pratique. Mais, j'en suis sûr, il y a bien peu d'ingénieurs, si même il y en a, qui se fassent réellement de leur noble profession une idée aussi mesquine. Leur fonction, et ils la remplissent, est d'observer avec patience et de découvrir par l'observation des propriétés de la matière et des résultats de combinaisons matérielles. Mais des questions plus élevées sont toujours présentes à l'esprit du véritable ingénieur, et toujours pleines d'intérêt pour lui; et en face d'une tentative

(¹) A propos du passage mis entre crochets, *voir* l'Appendice placé après ce discours, p. 163.

quelconque faite en vue de pénétrer au-dessous de la surface des choses, il sera le dernier à poser une objection autre que cette question pratique : Est-il vraisemblable que cela soit tout à fait futile? Et maintenant, au lieu d'imaginer que la question : qu'entendez-vous par expliquer une propriété de la matière? nous ait été posée pour nous embarrasser, et, au lieu de nous en irriter, supposons que le questionneur nous soit sympathique, et consentons à essayer de lui répondre. Ce n'est pas très facile. Toutes les propriétés de la matière sont tellement liées les unes aux autres, que nous pouvons à peine imaginer comment on en *expliquerait une complètement* sans apercevoir ses relations avec toutes les autres, sans avoir, en un mot, l'explication de toutes les autres; et tant que nous n'en serons pas là, nous ne pourrons pas dire ce qu'on entend par *expliquer une propriété* ou *expliquer les propriétés* de la matière. Mais, bien que ce but suprême ne puisse jamais être atteint par l'homme, la Science peut s'en rapprocher pas à pas, et je crois qu'elle y marchera par bien des routes différentes convergeant vers lui de toutes parts. La théorie cinétique des gaz est, comme je l'ai dit, un pas véritable dans l'une de ces voies. Dans la voie bien différente de la science chimique, H. Sainte-Claire Deville est arrivé à sa belle théorie de la dissociation sans recevoir le moindre secours de la théorie cinétique des gaz. Le fait qu'il l'a édifiée en s'appuyant seulement sur des observations et des expériences de Chimie, et qu'il l'a exposée en dehors de toute hypothèse, sans même avoir conscience, semble-t-il, de la belle explication qu'en donne la théorie cinétique des gaz, en a fait, dès le moment où il la publia pour la première fois, une théorie chimique indépendante, d'une solidité et d'une importance auxquelles elle eût pu à peine prétendre à cette époque, si elle avait été tout d'abord donnée comme une probabilité déduite de la théorie cinétique des gaz, et confirmée seulement après coup par l'observation. Mais aujourd'hui, guidés par les aperçus que nous ont donnés Clausius et Williamson sur les échanges continuels qui s'opèrent entre les éléments associés dans les molécules composées constituant les composés chimiques dans l'état gazeux, nous voyons dans la théorie de Deville un point

de rencontre du plus haut intérêt entre ces deux voies du progrès scientifique, la voie de la Physique et celle de la Chimie.

Revenons à l'élasticité : si, au moyen d'une matière dénuée d'élasticité, nous pouvions former un système composé de parties mobiles les unes par rapport aux autres, et qui aurait en vertu de ces mouvements les caractères essentiels d'un corps élastique, nous aurions à coup sûr, sinon fait un pas certain vers la théorie cinétique de la matière, du moins posé un jalon et marqué la voie qui pourrait nous conduire à une telle théorie. Comme je l'ai déjà montré, nous pouvons y parvenir de diverses manières [1]. Dans la dernière Communication indiquée en note, et dont le titre seul a été publié jusqu'à présent, j'ai développé les conséquences de l'étude mathématique qui a été faite, dans le passage signalé de la *Philosophie naturelle* de Thomson et Tait, d'un système dont le fonctionnement était réglé au moyen de gyrostats; et j'ai montré qu'un système idéal de particules matérielles agissant les unes sur les autres par l'intermédiaire de ressorts sans masse [2] peut être parfaitement imité au moyen d'un appareil formé de tringles rigides articulées et de volants animés d'un rapide mouvement de rotation, portés par quelques-unes de ces tringles ou par toutes. L'imitation n'est pas limitée aux cas d'équilibre. Elle est encore fidèle dans le cas d'un mouvement vibratoire amorcé en écartant très peu le système d'une de ses positions d'équilibre stable et l'abandonnant ensuite à lui-même. Ainsi, nous pouvons construire un système gyrostatique tel qu'il soit en équilibre sous l'action de certaines forces réelles appliquées en différents points de ce système; toutes ces forces sont les mêmes, et leurs points

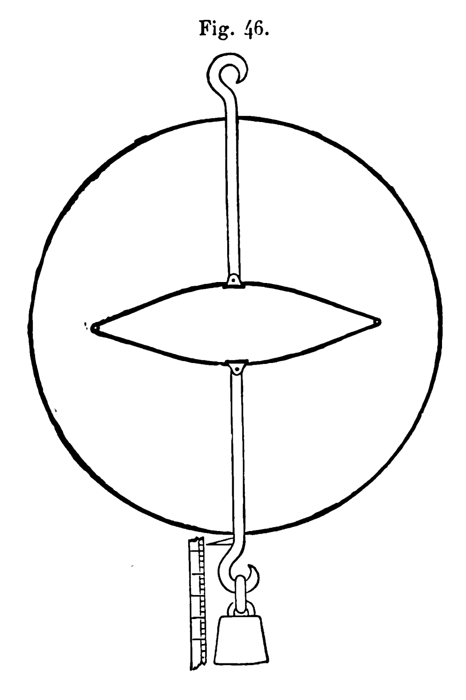
---

(1) Mémoire *Vortex Atoms* (*Proc. R. S. E.*, février 1867); extrait d'une Conférence faite à l'Institution Royale de la Grande-Bretagne, 4 mars 1881, sur l'*Élasticité envisagée comme pouvant être un mode de mouvement* (reproduit dans ce Volume); [*Natural Philosophy*, de Thomson et Tait, 2e édition, 1re partie, § 345, VIII à 345, XXVII; « *On oscillation and Waves in an Adynamic Gyrostatic system* » (simple titre), *Proc. R. S. E.*, mars 1883].

(2) Théorie ordinaire de l'élasticité : Fresnel, Navier, Poisson, Cauchy, Green, etc. M. B.

d'application ont la même situation que dans le système stable muni de ressorts. Alors, pourvu qu'on attribue aux tringles des masses convenables (c'est-à-dire une inertie de grandeur convenable et convenablement distribuée), on pourra supprimer dans chaque système les forces extérieures, et les vibrations qu'exécuteront les points d'application des forces seront encore identiques dans les deux cas. Nous pouvons

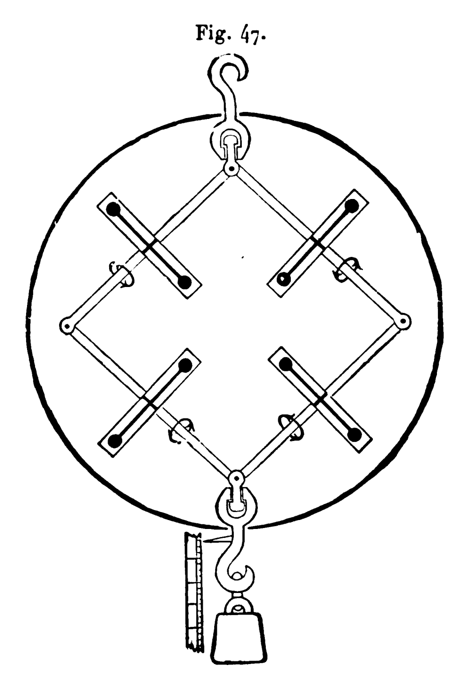
Fig. 46.



aussi faire agir sur le système de points matériels et de ressorts des forces données pendant un temps donné, puis l'abandonner à lui-même, et en faire autant pour le système gyrostatique; le mouvement qui prendra naissance sera le même dans les deux cas. Si dans un cas on rend les ressorts de plus en plus raides, et dans l'autre les vitesses angulaires des volants de plus en plus grandes, les périodes des mouvements vibratoires élémentaires deviendront de plus en

plus courtes, et les amplitudes de plus en plus faibles; les mouvements deviendront de plus en plus semblables à ceux de deux systèmes parfaitement rigides formés de points matériels mobiles dans l'espace et tournant suivant la loi de rotation bien connue d'un corps rigide ayant des moments d'inertie inégaux autour de ses trois axes principaux. Dans l'un des cas, cette liaison idéale presque rigide entre les particules est pro-

Fig. 47.



duite par des ressorts sans masse excessivement raides; dans l'autre cas, elle est produite par la rotation excessivement rapide des volants dans un système qui, lorsque les volants ne tournent pas, est parfaitement mou.

Les dessins placés devant vous (*fig.* 46 et 47) représentent deux systèmes matériels de cette espèce ([1]). Le sens de la

---

([1]) Dans la *fig.* 46 les deux crochets qu'on voit hors de la sphère sont reliés par un ressort de voiture. Dans la *fig.* 47, les crochets sont reliés à deux som-

rotation des volants du système gyrostatique (*fig.* 47) est indiqué par les ellipses directrices, qui montrent en perspective le sens de la rotation du volant de chaque gyrostat. Le système gyrostatique (*fig.* 47) aurait pu être constitué par deux tiges gyrostatiques, mais on en indique quatre, pour la symétrie. Le cercle représente, dans les deux figures, une enveloppe sphérique qui renferme le système et empêche de voir l'intérieur. Au dedans de l'une des enveloppes sont les volants, au dedans de l'autre est un ressort sans masse. Les crochets se comportent dans les deux cas comme s'ils étaient unis par un ressort. Si nous suspendons un des systèmes par l'un des crochets qui traversent l'enveloppe et si nous accrochons un poids à l'autre crochet, le poids, dès qu'il est accroché, se met à osciller verticalement; ce mouvement continuerait indéfiniment, si le système était absolument dépourvu de frottements. Si nous arrêtons le mouvement avec la main, le poids va rester en repos, et la pointe se sera abaissée d'une certaine quantité; cette quantité est proportionnelle au poids qui a été accroché, comme dans un peson à ressort ordinaire.

Donc, au moyen de matériaux doués de rigidité, mais entièrement dépourvus d'élasticité, nous avons construit un parfait modèle de ressort semblable au ressort d'un peson. Relions des millions de millions de particules par des couples de tiges semblables à celles de ce peson à ressort, et nous aurons un groupe de particules constituant un solide élastique; ce système répondra exactement aux conditions mathématiques idéales posées par Navier, Poisson, Cauchy et bien d'autres mathématiciens qui, suivant leur exemple, ont essayé de fonder une théorie de l'élasticité des solides sur les attractions et les répulsions mutuelles s'exerçant dans un groupe

---

mets opposés d'un cadre articulé; chacun des quatre côtés de ce cadre porte un gyrostat dont le volant a son axe de rotation en coïncidence avec l'axe de la tringle qui le porte. Chacun des crochets de la *fig.* 47 est relié au cadre par un porte-mousqueton; le cadre gyrostatique tout entier peut ainsi recevoir un mouvement de rotation autour de l'axe des deux crochets, mouvement destiné à annuler le moment de rotation total du cadre autour de cet axe, développé par la rotation des volants des gyrostats.

de particules matérielles ([1]). Tout ce qu'on peut déduire de cette théorie et de son hypothèse de forces agissant en vertu d'une loi quelconque, fonction de la distance, le système gyrostatique *le réalise*. Il y a plus, le système gyrostatique possède des propriétés que ne peut posséder le système de particules matérielles douées d'actions mutuelles; il constitue un solide élastique capable de déterminer la rotation magnétique du plan de polarisation de la lumière découverte par Faraday, si l'on suppose notre solide destiné à être un modèle d'éther lumineux construit pour illustrer la théorie ondulatoire de la lumière. L'appareil gyrostatique, quand il joue le rôle d'un peson à ressort, est disposé de manière à avoir dans son ensemble un moment de rotation nul; il ne peut, par conséquent, aucunement déterminer la rotation de Faraday; avec cette disposition le système représente l'éther lumineux dans un champ dépourvu de force magnétique. Mais imprimons au parallélogramme articulé une vitesse de rotation différente autour de l'axe des deux crochets, de telle sorte qu'il y ait un moment de rotation résultant autour d'une ligne donnée passant par le centre d'inertie du système; supposons encore que des couples de crochets semblables à ceux de l'appareil ainsi modifié, et qui n'est plus un modèle de peson à ressort simple, soient employés comme tout à l'heure à relier des millions de couples de particules, les directions des axes de ces rotations d'ensemble étant toutes parallèles : nous avons ainsi un modèle de solide élastique qui a la propriété de faire tourner, autour de la ligne de propagation, la

---

([1]) THOMSON, *Molecular constitution of matter* (*Proc. R. Soc. Ed.*, 1889). — *Motion of a viscous liquid; Equilibrium or motion of a elastic solid*; *Equilibrium or motion of an ideal substance, called for brevity* ether; *mechanical representation of magnetic force* (1890). — *On a gyrostatic adynamic constitution for ether* (*C. R.*, 1889; *Proc. R. Soc. Ed.*, 1890). — *Ether, Electricity and ponderable matter* (1889).

Ces Mémoires qui forment les articles XCXVII, XCXIX, C, CII des *Mathematical and physical Papers* de Sir W. Thomson, t. III, sont analysés à la fin du Volume avec les Leçons *On molecular Dynamics*. Les conditions de continuité à travers la surface de séparation de deux milieux gyrostatiques ne sont pas les mêmes que pour deux milieux élastiques (art. XCIX, § 17-20).

(M. B.)

direction de la vibration dans des ondes propageant, au travers du solide, des vibrations rectilignes; c'est exactement ce qui a lieu, d'après les observations de Faraday, pour une vibration lumineuse traversant un milieu dense placé entre les pôles d'un aimant puissant. Le cas où le front de l'onde est perpendiculaire aux axes de rotation d'ensemble (c'est-à-dire, où la direction de propagation est parallèle à ces lignes) correspond, dans notre appareil mécanique, au cas où la lumière se propage suivant la direction des lignes de force dans un champ magnétique.

Dans ces modèles de démonstration, nous voyons des portions d'une matière rigide idéale agissant les unes sur les autres, grâce à des pressions normales qui s'exercent en des points de contact mathématiques : naturellement, on suppose qu'il n'y a pas de frottement. Il est excessivement intéressant de voir comment, sans autre point de départ que l'inertie, la rigidité et l'impénétrabilité, on peut ainsi non seulement construire de toutes pièces un solide élastique ou un système quelconque de solides élastiques, mais encore reproduire complètement un phénomène aussi complexe et aussi mystérieux que le passage de la lumière polarisée à travers un champ magnétique. Mais maintenant, pour arriver à nous débarrasser finalement de ce postulat de la rigidité de nos matériaux, supposons que quelques-uns d'entre eux soient complètement dénués de rigidité, et doués seulement d'inertie et d'incompressibilité, ainsi que d'impénétrabilité relativement à la matière qui reste encore rigide. Avec ces postulats, nous pouvons réaliser un parfait modèle d'action à distance s'exerçant entre des particules solides; nous nous trouvons alors dans des conditions qui permettent, suivant le vif désir de Newton et de Faraday, d'expliquer l'action à distance par une action continue à travers un milieu intermédiaire. La loi de la force dans notre modèle n'est cependant pas la loi simple de Newton; c'est la loi bien plus compliquée de l'action mutuelle entre deux électro-aimants, avec cette différence, que dans le modèle hydrocinétique, la force est dans tous les cas opposée en direction à la force qui lui correspondrait dans le système électro-magnétique analogue. Imaginons un solide

percé d'un trou et placé dans notre liquide parfait idéal. Supposons, pour le moment, que le trou soit fermé par un diaphragme; qu'on applique pendant un instant une impulsion uniforme sur toute la surface du diaphragme, et qu'au bout de ce temps celui-ci se dissolve instantanément dans le liquide. Cette action provoque dans le liquide, par rapport au solide, un mouvement relatif de l'espèce que j'ai appelée *circulation sans rotation*, et qui reste absolument constant quel que soit le mouvement du solide à travers le liquide. Ainsi, à un moment quelconque, le mouvement réel du liquide en un point quelconque au voisinage du solide sera le mouvement résultant de celui qu'il aurait en vertu de la circulation seule, si le solide était en repos, et de celui qu'il aurait en vertu du mouvement du solide lui-même, s'il ne s'était pas établi de circulation à travers l'ouverture. Une remarque intéressante et importante, à faire en passant, est que l'énergie cinétique totale du liquide est la somme des énergies cinétiques qu'il aurait séparément dans les deux cas. Eh bien, imaginez que le liquide tout entier soit enfermé dans une enceinte rigide infiniment grande, et que dans ce liquide, à une distance infinie d'une portion quelconque de l'enceinte, deux de ces solides perforés, traversés chacun par une circulation sans rotation, soient placés l'un près de l'autre, et au repos. Le mouvement résultant de ces deux circulations de liquide donnera lieu à une pression sur les deux corps, et si cette pression n'est pas équilibrée, elle les mettra en mouvement. Les systèmes de forces, force et couple, ou système de deux forces, qui les empêcheraient de se mouvoir, sont des forces mutuelles et opposées; ces systèmes sont égaux en grandeur, mais opposés en direction aux systèmes de forces mutuelles qu'il faudrait appliquer, pour les maintenir en repos, à deux électro-aimants remplissant la condition suivante. Ces deux électro-aimants doivent avoir la même forme et la même grandeur que les deux corps, et occuper les mêmes positions relatives; ils doivent être constitués par des courants électriques répartis, en couches infiniment minces, sur la surface de solides possédant des propriétés diamagnétiques très énergiques, autrement dit une perméabilité infiniment faible. La distribution du courant sur

chaque corps peut être une quelconque de celles qui répondent à cette condition, que le courant total à travers une ligne fermée quelconque tracée sur la surface et traversant une fois l'ouverture soit égal à la fraction $\frac{1}{4\pi}$ de la circulation [1] à travers l'ouverture dans le système hydrodynamique analogue.

On pourrait imaginer de prendre cette action à distance, ainsi déterminée par le mouvement d'un liquide, comme base d'une théorie de l'équilibre et des vibrations des solides élastiques, et de la propagation d'ondes semblables à celles de la lumière à travers un milieu solide étendu quasi élastique. Mais, malheureusement pour cette conception, l'équilibre est essentiellement instable à la fois dans le cas des aimants et, bien que les forces soient directement opposées, dans le cas du système hydrocinétique qui lui est analogue, quand les divers corps mobiles (qu'il y en ait deux ou un plus grand nombre) sont ainsi placés dans les positions relatives correspondant à l'équilibre. Si cependant, dans le système hydrocinétique, nous réunissons, par des liens rigides articulés, les corps perforés et traversés par une circulation, nous pourrons les disposer de manière à obtenir des figures d'équilibre stable. Ainsi, sans volants, mais avec des circulations de liquide à travers des ouvertures, nous pouvons faire un modèle de peson à ressort ou un modèle d'éther lumineux, doué ou non du pouvoir rotatoire correspondant à celui que possède l'éther véritable dans le champ magnétique; bref, nous pouvons réaliser au moyen de solides perforés traversés par des circulations, tout ce que nous avons reconnu possible d'obtenir au moyen de gyrostats articulés. Mais avec les corps perforés et la circulation, nous pouvons aller plus loin qu'avec les gyrostats articulés. Nous pouvons réaliser un modèle de gaz. L'action mutuelle à distance, attractive ou

---

[1] L'intégrale de la composante tangentielle de la vitesse tout le long d'une courbe fermée quelconque, traversant une fois l'ouverture, est définie comme la *constante cyclique*, ou la *circulation*. [*Vortex Motion*, § 60 *a* (*Trans. R. S. E.*, 29 avril 1867)]. Elle a la même valeur pour toutes les courbes fermées traversant une seule fois l'ouverture, et reste toujours constante, que le solide soit en mouvement ou en repos.

répulsive suivant les positions relatives des deux corps quand ils passent l'un près de l'autre à la distance correspondant à la collision [1], suffit à produire le changement de direction du mouvement pendant la collision, changement qui est la base essentielle de la théorie cinétique des gaz, et qui, comme nous l'avons vu, peut aussi bien être dû à une attraction qu'à une répulsion, autant que nous puissions le savoir d'après les recherches faites jusqu'ici sur cette théorie.

Il reste cependant, comme nous l'avons vu, la difficulté de parer au cas de chocs réels entre les solides : on peut y parvenir en les munissant de ressorts à boudin sans masse, ou, ce qui revient au même, en leur attribuant des forces répulsives assez puissantes à de très faibles distances pour empêcher absolument les chocs entre solide et solide ; à moins qu'on n'adopte l'idée, tout aussi difficile à accepter, de solides perforés infiniment petits, traversés par des circulations liquides infiniment grandes. N'était cette difficulté fondamentale, le modèle hydrocinétique de gaz serait excessivement intéressant; et bien qu'on puisse difficilement admettre qu'il représente fidèlement un gaz réel, il aurait encore quelque importance en tant qu'assemblage de matériaux solides et liquides capables de représenter, tout en étant eux-mêmes dénués d'élasticité, l'élasticité d'un gaz réel.

Mais enfin, puisque le modèle hydrocinétique de gaz constitué par des solides perforés ou des circulations de liquide reste imparfait à cause des chocs entre solides, supprimons les solides, et laissons le liquide accomplir sa circulation sans rotation autour de vides [2] occupant la place des noyaux

---

(1) D'après cette idée, il n'y a pas de distance précise, ou de condition bien définie touchant la distance à laquelle deux molécules qui se dirigent l'une vers l'autre semblent être en collision, ou, si elles s'éloignent l'une de l'autre, cesser d'être en collision. Il est cependant commode, dans la théorie cinétique des gaz, d'adopter arbitrairement une définition précise de la collision, d'après laquelle deux corps ou deux particules agissant à distance l'un sur l'autre peuvent être dits *en collision* quand leur action mutuelle dépasse une limite définie assignée arbitrairement, comme, par exemple, lorsque le rayon de courbure de la trajectoire de l'un ou l'autre corps est inférieur à une fraction donnée ($\frac{1}{100}$ par exemple) de leur distance.

(2) On trouvera des recherches sur les tourbillons sans noyaux dans un

solides que nous avons considérés jusqu'ici; ou bien annulons la rigidité des noyaux solides des anneaux, et imprimons-leur une rotation moléculaire conforme à la théorie du mouvement tourbillonnaire d'Helmholtz. La stabilité n'est possible que si la rotation moléculaire est susceptible de donner à la surface du noyau liquide tournant une vitesse égale à celle du liquide qui circule sans rotation tout contre lui; j'ai en effet montré que l'existence d'un glissement avec frottement est incompatible avec la stabilité. Il y a une autre condition, sur laquelle je ne peux pas donner de détails en ce moment, mais qu'on pourra comprendre d'une manière générale, si je dis qu'elle suppose la rotation moléculaire uniforme, ou croissante de la surface vers l'intérieur; cette condition est analogue à celle qui exige que la densité d'un liquide en repos sous l'action de la pesanteur, par exemple, soit ou uniforme, ou plus grande au fond qu'à la surface, pour que l'équilibre soit stable. Tout ce que j'ai dit en faveur du modèle de gaz tourbillon composé de solides perforés traversés par des circulations de liquide subsiste sans modification pour le modèle purement hydrodynamique, composé soit d'anneaux tourbillons à noyaux de Helmholtz, soit de tourbillons sans noyaux; et avec lui, nous ne sommes plus arrêtés par des difficultés du genre de celles que soulèvent les chocs entre solides. Cependant, je ne peux pas entreprendre de dire avec certitude en ce moment si, lorsque la théorie tourbillonnaire des gaz sera complètement développée, on n'y trouvera pas un défaut analogue à celui que j'ai déjà signalé à propos de la théorie cinétique des gaz considérés comme constitués par de petites molécules solides élastiques [1]. Il me semble très probable que la théorie tourbillonnaire des gaz ne se trouvera pas en défaut de cette manière, parce que tout ce que j'ai été capable de découvrir jusqu'ici au sujet de la vibration [2] des

Mémoire de l'auteur [*Vibrations of a columnar Vortex* (*Proc. R. S. E.*, 1er mars 1880)], et dans un Mémoire de Hicks (*On the Steady Motion of a hollow Vortex*), lu devant la Société Royale, 21 juin 1883. Voir *Transactions R. S.*, pour 1883.

(1) Paragraphe entre crochets, p. 150, et Appendice, p. 163.

(2) *Voir* les Mémoires de l'Auteur, *On Vortex Motion* (*Trans. R. S. E.*,

tourbillons, pourvus ou non de noyaux, ne me semble pas impliquer, pour les énergies de translation ou d'impulsion des tourbillons individuels, de tendance à se perdre sous la forme d'énergie de vibrations de plus en plus faibles.

Il y a certainement un très grand intérêt à noter, comme constituant un pas vers une théorie cinétique de la matière, la remarque suivante : la quasi-élasticité, ou élasticité semblable à celle d'un ruban de caoutchouc, que nous apercevons dans une couronne de fumée vibrante lancée par une ouverture elliptique, ou dans deux couronnes de fumée qui, d'abord circulaires, ont été déformées à la suite d'un choc mutuel, est en réalité une élasticité virtuelle contenue dans une matière dépourvue d'élasticité et même de rigidité; c'est l'élasticité virtuelle due au mouvement, et engendrée par la génération du mouvement.

APPENDICE.

Pendant le temps qui s'est écoulé entre l'impression de cet article et l'achèvement du Volume, j'ai dû revenir sur une opinion qui y est exprimée, à savoir que le résultat moyen de très nombreuses collisions ayant lieu au sein d'une agglomération de molécules solides parfaitement élastiques tendrait à la conversion de toute l'énergie de translation en énergie vibratoire, les modes de vibration devenant de plus en plus nombreux, et les périodes de plus en plus courtes. Je retire donc tout ce qui est compris dans le passage placé entre crochets (p. 150). L'opinion émise dans ce passage s'est présentée d'abord à moi comme une conséquence nécessaire d'un théorème que Maxwell m'indiqua dans une conversation comme ayant été découvert par Boltzmann; d'après ce théorème, le résultat moyen, au point de vue de la diffusion de l'énergie, de très nombreuses collisions ou actions mutuelles

---

avril 1867), et *Vortex Statics* (*Proc. R. S. E.*, décembre 1875); *voir* aussi un Mémoire de J.-J. Thomson (B. A.), *On the Vibrations of a Vortex Ring* (*Trans. R. S.*, décembre 1881), et son important Ouvrage *On Vortex Motion* (présenté pour le prix Adams en 1882).

entre différents systèmes matériels, est l'égalité des valeurs moyennes de l'énergie par rapport au temps ([1]) pour chacun des modes de mouvements composants possibles (comme, par exemple, trois composantes d'un mouvement de translation du centre d'inertie, et les vitesses angulaires de rotation autour des trois axes principaux d'un solide). Si le théorème était vrai, l'énergie de solides élastiques qui se choquent finirait par devenir entièrement vibratoire, parce qu'il y a un nombre infini de modes de mouvement vibratoire, et seulement six pour les translations et les rotations. J'ai indiqué cette conclusion à Maxwell, dans une carte postale datée probablement du 4 février 1878, et écrite dans le train entre Cambridge et Londres, si mes souvenirs sont exacts, certainement peu d'heures après qu'il m'eut cité le prétendu théorème de Boltzmann. Ce fut notre dernière rencontre, et il n'a plus été question de cela dans les lettres que nous échangeâmes dans la suite, autant qu'il m'en souvienne.

Je n'ai jamais cru qu'il fût possible d'admettre ce théorème à propos de la distribution de l'énergie; et le travail que Maxwell a publié à son sujet dans les *Transactions* de la Société philosophique de Cambridge (6 mai 1878, p. 713-741 du t. II de la collection de ses Mémoires) ([2]) ne me semble ni

---

([1]) $\frac{1}{T}\int_0^T U\,dt$.

([2]) Dans ce Mémoire, Maxwell s'exprime ainsi :

« Il résulte de ce théorème (de Boltzmann) que dans l'état définitif du système, l'énergie cinétique moyenne de deux portions données du système est dans le même rapport que le nombre de variables indépendantes nécessaire pour définir la configuration actuelle de chacune de ces portions. Telle est la condition d'égalité de température de ces deux portions.

» Ainsi, à une température donnée, l'énergie cinétique totale d'un système matériel doit être le produit du nombre de variables indépendantes du système par une constante, qui est la même pour tous les corps à la même température et ne diffère, en fait, de la température thermodynamique que par un facteur constant.

» Si donc la température s'élève d'un degré, l'énergie cinétique s'accroît d'une quantité constante C multipliée par le nombre n de variables indépendantes.

» La chaleur spécifique observée, convertie en mesure dynamique, est l'accroissement de l'énergie totale pour une élévation de température d'un degré;

le démontrer dans toute sa généralité, ni faire croire qu'il puisse être vrai dans quelques cas spéciaux. Cependant je pensais, jusqu'à ces derniers temps, que le corollaire particulier énoncé dans le passage de ce Volume que je supprime aujourd'hui (p. 150-151) devait être vrai. Je vois maintenant qu'au contraire l'effet moyen des collisions entre des solides élastiques vibrants doit tendre à diminuer l'énergie vibra-

---

elle ne peut donc être inférieure au produit C*n*, que si l'énergie potentielle décroît quand la température s'élève. »

La seule condition que Maxwell suppose remplie dans sa démonstration, c'est que « le système abandonné à lui-même dans son état actuel passera tôt ou tard par tous les états compatibles avec la conservation de l'énergie. » Maxwell cite lui-même deux exceptions importantes : Si, par suite de la loi même des forces internes, le mouvement est périodique, aux déplacements actuels correspondent certaines vitesses qui se reproduiront en même temps que les déplacements. Les autres états, dans lesquels les mêmes déplacements seraient accompagnés de vitesses quelconques soumises à la seule condition que l'énergie totale soit conservée, ne se produiront pas tous, la démonstration est en défaut, et le doute n'est que trop naturel pour le cas où une partie des mouvements est périodique.

Toutes les fois que le système est assujetti, outre l'équation des forces vives, à une ou plusieurs équations de condition : il en résulte nécessairement l'exclusion d'un certain nombre d'états compatibles avec l'équation des forces vives mais incompatibles avec les équations de condition : tel est le cas cité par Maxwell d'un corps qui n'est soumis à aucune force intérieure et qui satisfait par conséquent aux six équations de l'équilibre. A vrai dire, il n'y a pas là de difficulté véritable; on a compté six variables indépendantes de trop, il faut les éliminer.

Il n'en est pas moins certain qu'avant de tenter l'application du théorème de Boltzmann, il faut montrer que le système va bien passer par *tous* les états compatibles avec l'équation de conservation de l'énergie. L'absence d'équations de condition apprend seulement que tous ces états sont possibles, mais le sont-ils tous en partant de l'état actuel? Pour les systèmes enfermés dans un vase, chaque choc contre la paroi troublera le mouvement de l'ensemble. « Il est difficile, dans un cas si extraordinairement complexe, dit Maxwell, d'arriver à une conclusion entièrement satisfaisante, mais nous pouvons affirmer, avec grande confiance, que, sauf pour certaines formes particulières des parois, le système passera tôt ou tard, après un nombre suffisant de rencontres, par tous les états compatibles avec l'équation de l'énergie. »

Quant aux développements mathématiques, Sir W. Thomson « ne saurait y voir nulle preuve de la conclusion que *l'énergie cinétique moyenne correspondant à une quelconque des variables est la même pour chacune d'elles.* » L'interprétation de cet énoncé est rendue peu claire par la nécessité de choisir

toire, pourvu que l'énergie totale de chaque solide pris individuellement soit inférieure à une limite dépendant de la forme ou des formes des solides : d'après cela, comme aucune portion de l'énergie totale n'est perdue, le résultat définitif doit être la conversion de l'énergie tout entière, sauf une proportion infinitésimale, en énergie de translation et de rotation.

---

les variables indépendantes de manière que l'énergie cinétique soit une somme de carrés. [*On some test cases for the Maxwell-Bolztmann doctrine regarding distribution of Energy* et *On instability of periodic motion* (*Proc. Roy. Soc.*, 1891)]. Sir W. Thomson a montré (*Ph. Mag.*, 1891) que, dans un système formé d'un nombre limité de parties, on peut, *pour chaque valeur de l'énergie totale,* trouver une trajectoire décrite périodiquement; de telle sorte que le système abandonné avec la configuration et les vitesses convenables parcourt cette trajectoire sans s'en écarter, et ne prend à aucun moment les autres configurations compatibles avec la même valeur de l'énergie. D'ailleurs, faut-il attribuer la même importance à tous les états compatibles avec l'équation de l'énergie? Dans un groupe de sphères homogènes indéformables et polies, la force vive de rotation de chaque sphère est invariable; il ne faut donc pas compter comme variables indépendantes les angles qui définissent l'orientation de ces sphères. Mais à quels caractères reconnaîtra-t-on, dans le système général de Maxwell, une exclusion de ce genre qui ne résulte pas d'une liaison purement géométrique? Si les solides indéformables perdent, *si peu que ce soit,* l'une de leurs qualités (ellipsoïde; centre de gravité hors du centre de figure; surface rugueuse) aussitôt il semble, *le temps aidant,* que les trois angles d'orientation doivent compter. Pour attribuer la même importance à toutes les déformations indépendantes, ne faut-il pas qu'elles soient à peu près *également* probables? et que faut-il entendre par là?

On jugera de l'intérêt de cette discussion par les conséquences qui résulteraient d'une application brutale du théorème de Boltzmann pour les gaz : Si chaque raie du spectre d'un gaz indique une déformation indépendante possible de la molécule gazeuse, l'énergie cinétique qui correspond à chacune de ces déformations a la même valeur, égale au tiers de la force vive de translation de la molécule. Même en admettant, comme je crois qu'on doit le faire (*Comptes rendus*, 1891) que toutes les raies d'un même groupe ne correspondent qu'à une seule déformation distincte; les valeurs de la force vive qui en résulteraient paraissent difficilement conciliables avec les chaleurs spécifiques observées des différents gaz.

Voir aussi H. POINCARÉ, *Sur le problème des trois corps et les équations de la Dynamique* (*Acta mathematica,* 1890). (M. B.)

VII.

LES SIX PORTES DE LA CONNAISSANCE.

ALLOCUTION PRÉSIDENTIELLE A *Birmingham and Midland Institute*, PRONONCÉE A L'HOTEL DE VILLE DE BIRMINGHAM, LE 3 OCTOBRE 1883.

Il y a plus de cinq sens; le sens du toucher doit être divisé en deux autres, celui de la rugosité et celui de la température. — Y a-t-il un sens magnétique? — L'ouïe; l'oreille et les variations de la pression atmosphérique; caractère subjectif du son. — La vue : lumières visibles et invisibles; radiations actiniques, lumineuses, calorifiques; caractère subjectif de la lumière. — Tous les sens se rattachent à la force. — Goût et odorat. — Différence entre les sensations dues à la lumière et à la chaleur rayonnante. — Sens de la force, sens de la résistance, sens de la rugosité.

Le titre de l'entretien de ce soir pourrait être, si l'on me demandait de lui donner un titre, « Les six portes de la connaissance ». Le sujet que je me dispose à traiter devant vous me paraît avoir des rapports étroits avec les études correspondant aux divers prix qui ont été donnés. La question sur laquelle je désire appeler votre attention est la suivante : quels sont les moyens par lesquels l'esprit humain acquiert la connaissance du monde extérieur?

John Bunyan compare l'âme humaine à une citadelle placée sur une colline, se gouvernant elle-même et ne pouvant communiquer avec le monde extérieur que par cinq portes : la porte œil, la porte oreille, la porte bouche, la porte nez, et la porte toucher ([1]). Évidemment ici Bunyan n'a pas trouvé le

---

([1]) *Feel Gate : feel, feeling*, en anglais, désignent proprement la perception déterminée par le toucher, c'est le sens lui-même; *touch* est l'action de toucher; ces deux mots correspondent aux mots français *toucher* et *tact*. Le *toucher* est le sens, le *tact* est le toucher en exercice. (P. L.)



mot juste. Il emploie « toucher » pour « tact »; cette confusion est aujourd'hui si commune que je peux à peine l'accuser d'incorrection. En même temps, l'expression la plus correcte et la plus claire serait, sans aucun doute, « le sens du toucher ». Feu le Dr George Wilson, qui fut d'abord professeur de Technologie à l'Université d'Édimbourg, publia quelque temps avant sa mort, sous le titre de « Les cinq portes de la connaissance » (*The five Gateways of Knowledge*), un beau petit livre dans lequel il cite John Bunyan comme je viens de le faire. Mais j'ai dit les *six* portes de la connaissance, et je dois m'efforcer de justifier mon dire. Je vais essayer de vous prouver que nous avons six sens, que si nous voulons dénombrer tous nos sens, nous devons en compter six.

Le seul dénombrement des sens qui, jusqu'à présent, autant que je sache, en ait considéré plus de cinq, est le dénombrement de l'Irlandais, dans lequel on en voit figurer sept. Je présume que le septième sens de l'Irlandais était le sens commun; et cette vertu, commune chez mes compatriotes (je parle ici en ma qualité d'Irlandais), ce septième sens, qu'à mon avis les Irlandais possèdent à un si haut degré, fera plus, je le crois, pour soulager les infortunes de l'Irlande, que ne ferait même la suppression du « mélancolique océan » qui entoure ses côtes. De plus, je ne vois pas scientifiquement comment nous pourrions trouver plus de six sens. Cependant, si le temps me le permet, je reviendrai sur cette question d'un septième sens, et j'essayerai d'émettre quelques idées en vue de répondre à cette question : Y a-t-il ou n'y a-t-il pas un sens magnétique? Il est possible qu'il y en ait un, mais jusqu'ici aucun fait, aucune observation ne prouvent son existence.

Les six sens que j'ai ce soir l'intention d'expliquer, autant que je le pourrai, sont, suivant l'énumération ordinaire : le sens de la vue, le sens de l'ouïe, le sens de l'odorat, le sens du goût et le sens du toucher divisé en deux subdivisions. Il y a environ cent ans, le Dr Thomas Reid, professeur de Philosophie morale à l'Université de Glasgow, a montré qu'il existe une grande différence entre le sens de la rudesse ou de la résistance, que possède la main, et le sens de la température.

Je ne crois pas que l'idée de Reid ait encore été développée autant qu'elle le mérite. On ne trouve, je crois, dans aucun Traité élémentaire de Philosophie naturelle, ni dans aucun des écrits des physiologistes où il est question des sens, une nomenclature bien nette des six sens. On a beaucoup disserté sur le sens musculaire et sur la sensibilité tactile; mais on n'a pas divisé d'une manière nette et tranchée le sens du toucher en deux autres, division qui me semble résulter de la manière dont le Dr Thomas Reid présente le sens du toucher, bien qu'il n'ait pas nettement formulé lui-même la distinction sur laquelle je vais maintenant m'expliquer.

Le sens du toucher, dont la main est ordinairement considérée comme l'organe, mais qui appartient à toute la surface sensible du corps, est très certainement double. Si je touche un objet, je perçois une sensation complexe. Je perçois une certaine sensation de rugosité, mais en même temps une autre sensation très différente, qui n'est pas celle de rugosité, ni celle de poli. Il y a ici deux sensations, essayons de les analyser. Je plonge mon doigt dans ce bol d'eau chaude. Au moment où je touche l'eau, j'éprouve une sensation très nette, une sensation de chaleur. Est-ce là une sensation de rugosité ou de poli? Non. Je plonge, d'autre part, mon doigt dans ce bassin d'eau glacée. J'éprouve une sensation très différente. Est-ce une sensation de rugosité ou de poli? Non. Est-elle comparable à la sensation de chaleur de tout à l'heure? Je dis que oui. Quoiqu'elle soit contraire, elle est comparable à la sensation de chaleur. Je ne vais pas dire qu'à cet ordre de phénomènes se rattachent deux espèces de sensations, celle du froid et celle du chaud. J'essayerai de montrer que les sensations de froid et de chaud se rapportent à une même qualité se manifestant à des degrés différents, mais que cette qualité est notablement différente du sens de la rugosité. Qu'est-ce donc que ce sens de la rugosité? Il me faudra assez de temps pour vous l'expliquer complètement. Aussi vous dirai-je par avance que c'est un sens de force; et, avant de justifier complètement ce que j'ai à dire, je veux vous avertir que les six sens au sujet desquels je désire vous donner quelques explications sont le sens de la vue,

le sens de l'ouïe, le sens du goût, le sens de l'odorat, le sens de la température et le sens de la force. Le sens de la force est le sixième sens; ou encore, le sens de la température et celui de la force sont les deux subdivisions du sens du toucher, et complètent la nomenclature des six sens dont j'essaye de vous démontrer l'existence.

J'ai fait allusion à la possibilité de l'existence d'un septième sens, un sens magnétique; bien que cette question soit un peu en dehors de la voie que je me propose de suivre, bien que le temps soit précieux et que je ne puisse pas me permettre beaucoup de digressions, je désire vous enlever la pensée que je songe, en quoi que ce soit, à ces misérables superstitions du magnétisme animal, des tables tournantes, du spiritisme, du mesmérisme, de la clairvoyance et des esprits frappeurs, dont vous avez tant entendu parler. Il n'y a pas un septième sens de nature mystique. L'idée de la clairvoyance, et de tout ce qui lui ressemble, résulte principalement d'observations mal faites, auxquelles viennent s'ajouter cependant les effets d'une imposture voulue agissant sur un esprit simple et sans défiance. Mais si vraiment il n'y a pas de sens magnétique distinct, je dis que c'est là une chose très étonnante.

Nous connaissons tous un peu le compas des marins, l'aiguille qui se dirige vers le nord, etc., mais un petit nombre d'entre nous seulement ont approfondi la question, et bien peu comprennent toutes les découvertes récentes relatives à l'électromagnétisme. Si j'avais à ma disposition les appareils nécessaires, je désirerais, avec votre permission, vous montrer une expérience de magnétisme. Il faudrait que nous eussions un aimant puissant; la machine qui nous donne cette belle lumière électrique par laquelle la salle est éclairée pourrait encore, si on l'employait à exciter un électro-aimant, constituer une partie de notre appareil; l'autre partie serait un morceau de cuivre. Supposez donc que nous eussions cet appareil, je vous montrerais un merveilleux phénomène découvert par Faraday, et au sujet duquel un excellent expérimentateur français, Foucault, a fait d'admirables travaux. J'ai dit qu'une des parties de cet appareil est un morceau de cuivre, mais de l'argent ferait aussi bien notre affaire. Aucun autre métal,

probablement, et certainement aucun de ceux qui sont maintenant bien connus et qu'on peut obtenir par des expériences ordinaires, ne possède, au même degré que le cuivre et l'argent, la propriété sur laquelle je vais maintenant attirer votre attention : on ne connaît du moins aucun autre métal, ni aucune autre substance, métallique ou non, qui la présente d'une manière aussi accusée.

La propriété en question est la « conductibilité électrique », et la conséquence de cette propriété, dans l'expérience que je vais maintenant vous décrire, est qu'un morceau de cuivre ou un morceau d'argent, si on le laisse tomber entre les pôles d'un aimant, tombera aussi lentement que s'il s'enfonçait dans de la boue. Je prends ce corps et je le laisse tomber. Un grand nombre d'entre vous sont capables de calculer la fraction de seconde qu'il mettra à parcourir 30 centimètres. Si, prenant ce morceau de cuivre, je le plaçais juste au-dessus de l'espace compris entre les pôles d'un puissant électro-aimant et l'abandonnais alors à lui-même, vous le verriez tomber lentement; peut-être ne descendrait-il que de quelques centimètres en un quart de minute.

Cette expérience a été exécutée dans des conditions où elle devait produire de très puissants effets, par Lord Lindsay (aujourd'hui Lord Crawford), assisté de M. Cromwell F. Varley. Ces deux hommes éminents voulaient faire des recherches sur les phénomènes du mesmérisme, qu'on avait appelé *magnétisme animal;* et ils se mirent à l'œuvre très sérieusement, dans le but d'exécuter une véritable expérience de Physique. Ils se posèrent cette question : est-il admissible, alors qu'un morceau de cuivre peut à peine se mouvoir dans l'air entre les pôles d'un électro-aimant, qu'un être humain ou une autre créature vivante placée dans les mêmes conditions n'éprouve aucun effet? Lord Lindsay fit faire un électro-aimant énorme, assez grand pour que la tête de toute personne désireuse de se soumettre à l'expérience pût aisément tenir entre les pôles, dans une région où la force magnétique est extrêmement intense. Quel résultat donna l'expérience? Si j'allais dire *aucun!* je ne serais pas juste. Le résultat fut merveilleux, et la merveille, c'est qu'on n'éprouvait rien. Je dis que c'est là

un fait extrêmement étonnant; mais je n'admets pas, je ne crois pas que le sujet soit épuisé. Je ne puis croire que l'aimantation, cet état particulier de la matière dans l'espace, qui produit de si prodigieux effets sur un morceau de métal, soit incapable de produire le moindre effet sur la matière d'un corps vivant : elle doit certainement en produire un; et même aujourd'hui, bien qu'on n'ait rien trouvé, il ne me paraît pas prouvé que la matière d'un corps vivant placé dans ces conditions n'éprouve absolument aucun effet *perceptible*. Il est si surprenant qu'il n'y ait pas d'effet du tout, que l'expérience doit être reprise; je crois, je suis convaincu qu'il y a un intérêt réel à rechercher si oui ou non une force magnétique excessivement intense a un effet perceptible sur un corps vivant, animal ou végétal. J'ai donc parlé d'un septième sens. Je crois qu'il est possible que ce soit justement un sens magnétique. Je crois qu'un effet magnétique excessivement puissant peut produire une sensation que nous ne pouvons comparer ni avec celle de la chaleur, ni avec celle de la force, ni avec aucune autre.

Une autre question qui se présente souvent est la suivante : « Y a-t-il un sens électrique? » Un être humain perçoit-il l'électricité dans l'air? On pourrait peut-être faire, il est vrai, des projets d'expériences à peu près semblables à la précédente, et relatives à l'électricité; mais un certain nombre de raisons, qu'il serait trop long de développer, m'empêchent de placer la force électrique dans la même catégorie que la force magnétique. Il y aurait une action superficielle qui annulerait pratiquement l'action exercée à l'intérieur par la force électrique et cette action superficielle serait une sensation définie que nous pourrions nettement découvrir par le sens du toucher. Tout le monde en plaçant sa main, ou son visage, ou sa chevelure, au voisinage d'une machine électrique, éprouve une sensation; quand on l'analyse, on reconnaît qu'il se produit un courant d'air, et que les cheveux sont attirés; si l'on approche trop la main, des étincelles passent entre la machine et la main ou le visage; de sorte qu'avant d'arriver à cette délicate question de la possibilité d'un sens de la force électrique, nous rencontrons des actions mécaniques bien accu-

sées, qui donnent lieu aux sensations de température et de force. Mais que cette mystérieuse et merveilleuse force magnétique, due, comme nous le savons maintenant, à des rotations des molécules, soit absolument sans effet, sans effet sensible, sur l'économie animale, voilà qui paraît très surprenant; c'est d'ailleurs un sujet qui mérite des recherches attentives. Personne, je l'espère, ne pensera que mes paroles sont favorables à la superstition du mesmérisme.

J'ai l'intention, si le temps me le permet, de m'expliquer un peu plus complètement, avant de terminer, sur nos perceptions relatives au double sens du toucher, le sens de la température, et le sens de la force. Mais je dois d'abord dire quelques mots des autres sens, car si j'insiste trop sur le sens de la température et sur le sens de la force, il ne me restera plus de temps pour parler des autres. Voyons donc ce que nous fait percevoir le sens de l'ouïe. L'Acoustique est la science de l'audition. Et qu'est-ce qu'entendre? C'est percevoir quelque chose au moyen de l'oreille. Qu'est-ce que nous percevons au moyen de l'oreille? Une chose que nous pourrions également percevoir sans son secours; une chose que Beethoven, le plus grand maître dans l'art des sons qui ait jamais vécu (le mot *son* étant pris ici dans son sens poétique et artistique), ne put percevoir au moyen de son oreille pendant une grande partie de son existence. Il devint sourd, en effet, à la fin de sa vie, et pendant cette période il a composé quelques-unes de ses plus belles œuvres musicales, sans qu'il lui fût possible de les entendre au moyen de son oreille elle-même; car cette faculté l'avait abandonné pour toujours. Mais il avait l'habitude d'appuyer contre ses dents une canne qu'il pressait sur le piano, et il pouvait ainsi entendre les sons qu'il tirait de l'instrument. Donc, outre la porte oreille de John Bunyan, le sens de l'ouïe a une autre porte, ou une autre entrée.

Qu'est-ce que nous percevons ordinairement par l'intermédiaire de l'oreille, ce qu'une personne bien portante, qui n'a perdu aucun des organes naturels des sens, perçoit au moyen de son oreille, mais pourrait aussi percevoir autrement, bien que d'une manière moins satisfaisante et moins

complète? C'est évidemment une variation de pression. Quand le baromètre monte, la pression sur l'oreille augmente; quand le baromètre descend, cela indique que la pression sur l'oreille diminue. Eh bien, si la pression venait à croître et à diminuer soudainement, dans un quart de minute par exemple (supposez que dans un quart de minute le baromètre ait monté de 2^{mm} et baissé de nouveau), percevrait-on quelque chose? J'en doute, je ne le crois pas. Si le baromètre montait de 5 centimètres, ou de 7, ou de 10, dans une demi-minute, la plupart des gens s'en apercevraient. Je vous donne cela comme un résultat de l'observation; en effet, les personnes qui descendent dans une cloche à plongeur éprouvent exactement la sensation qu'ils éprouveraient, si pour une cause inconnue le baromètre venait à s'élever rapidement, dans le cours d'une demi-minute, de 12 ou 15 centimètres au-dessus de la plus grande hauteur qu'il atteigne jamais à l'air libre. Nous avons donc le sens de la pression barométrique, mais nous n'avons pas d'indication continue qui nous permette de reconnaître si le baromètre est haut ou bas. Les hommes qui vivent aux altitudes élevées, à plusieurs centaines de mètres au-dessus du niveau de la mer, là où la hauteur du baromètre est inférieure de quelques centimètres à la valeur qu'elle a au niveau de la mer, ont, en ce qui concerne la pression, des sensations très semblables à celles qu'ils auraient à la surface de la mer. L'air vif des montagnes diffère de l'air des régions basses d'abord en ce qu'il est plus froid et plus sec, mais aussi en ce qu'il est moins dense; il faut en respirer une plus grande quantité pour introduire dans les poumons la même quantité d'oxygène, et pour accomplir ces fonctions que connaissent bien ceux des étudiants de cet Institut (et je sais qu'ils sont très nombreux) qui s'occupent de Physiologie animale. L'effet de l'air dans les poumons, la fonction qu'il remplit, dépend principalement de l'oxygène absorbé. Si la densité de l'air n'est que les trois quarts de ce qu'elle est dans l'atmosphère que nous respirons ordinairement ici, il faut en absorber une fois et un tiers de fois autant pour produire sur le sang la même oxydation, et sur l'économie animale le même effet général; et il n'est pas douteux qu'à

cause de cela l'air des montagnes n'ait sur les créatures vivantes un effet tout différent de celui de l'air des plaines. C'est ce que montre nettement son action sur la santé.

Mais je m'écarte de mon sujet; je ne veux considérer que des changements de pression comparables à ceux qui produisent le son. Une cloche à plongeur nous permet de percevoir un brusque accroissement de pression, mais pas au moyen du sens ordinaire du toucher. La main ne perçoit pas de différence entre une pression de 1^{kg} par centimètre carré s'exerçant tout autour d'elle, et des pressions de $1^{kg},2$, $1^{kg},3$, $1^{kg},5$ ou même de 2^{kg}, comme on le reconnaît en descendant dans une cloche à plongeur. Si l'on descend de 10 mètres dans une cloche à plongeur, la main supporte sur toute sa surface une pression de 2^{kg} par centimètre carré; mais on ne perçoit pas de différence dans la force ressentie, on ne perçoit pas de pression. Voici ce qui se passe : derrière le tympan se trouve une cavité remplie d'air; un excès de pression sur l'une des faces du tympan provoque une sensation douloureuse, et détermine quelquefois la rupture de cette membrane chez les personnes qui descendent brusquement dans une cloche à plongeur. Le remède contre cette sensation douloureuse, je devrais plutôt dire le moyen de la prévenir, consiste à mâcher un morceau de biscuit dur, ou à simuler cette action. En mâchant un biscuit dur, on maintient ouvert un conduit par lequel l'air pénètre jusque dans la caisse du tympan (¹); sa pression équilibre alors la pression extérieure, et la sensation douloureuse est ainsi évitée. Cette sensation éprouvée par l'oreille quand on descend dans une cloche à plongeur est due simplement à ce que l'une des faces d'une certaine membrane est plus pressée que l'autre; quand un organe aussi délicat que le tympan est soumis à une force aussi effrayante, il en résulte une grande souffrance, et cela peut être dangereux; c'est dangereux en effet; le tympan est rompu ou endommagé, à moins qu'on ne trouve un moyen d'obvier à la différence de pression; le moyen simple que j'ai

(¹) La trompe d'Eustache.



indiqué réussit parfaitement, je crois, à toutes les personnes douées d'une bonne santé.

Je crains que vous ne compreniez pas beaucoup mieux maintenant ce que vous percevez dans l'acte de l'audition. Voici en deux mots ce que c'est : vous percevez de brusques changements de pression qui agissent sur le tympan pendant un temps assez court et avec une force assez petite pour ne pas le blesser, mais suffisante pour donner naissance à une sensation très nette qui est communiquée au nerf acoustique par l'intermédiaire d'une suite d'osselets. Je n'ai pas à insister sur ce sujet; les détails en sont pleins d'intérêt, mais il me faudrait bien plus d'une heure si je voulais vous les donner. Aussitôt que nous avons atteint les nerfs et les os, nous avons dépassé les limites du sujet dont je voulais vous entretenir. Mon sujet est du domaine de la Science physique, de ce qu'on appelle en Écosse la Philosophie naturelle. La Science physique s'occupe de la matière inerte, et je sors de ses limites quand je parle d'un corps vivant; mais il faut bien parler des corps vivants quand on s'occupe des sens envisagés comme les agents de la perception, comme les intermédiaires par lesquels, pour employer le langage de John Bunyan, « l'âme dans sa citadelle » acquiert la connaissance du monde extérieur. Le physicien doit considérer les organes des sens simplement comme il considère son microscope; il n'a pas à s'occuper de la Physiologie. Cependant, il a beaucoup à se servir de ses yeux et de ses mains, et il doit compter avec eux, s'il veut comprendre ce qu'il fait, et s'il désire acquérir des idées raisonnables sur le sujet, quel qu'il soit, qu'il s'est proposé parmi ceux qui rentrent dans son domaine.

Quel est donc le phénomène extérieur qui détermine l'acte interne de l'audition et de la perception du son? Ce phénomène extérieur est un changement de pression de l'air. Voilà qui est bien; mais comment allons-nous maintenant donner une définition simple d'un son? Cela semble un cercle vicieux, et cependant ce n'en est pas un, que de dire : c'est un son si nous l'appelons son; si nous le percevons *comme* un son, c'*est* un son. Tout changement de pression assez brusque pour que nous le percevions comme son est un son. Voici un son (un

brusque battement de mains). Il ne peut y avoir de discussion sur ce point, personne ne demandera : est-ce ou n'est-ce pas un son? C'est un son si vous l'entendez. Si vous ne l'entendez pas, ce n'est pas un son pour vous. C'est tout ce que je peux dire pour définir le son. Pour en expliquer la nature, je puis dire que c'est un changement de pression, et qu'il ne diffère d'un changement de pression graduel semblable à celui que nous montre le baromètre, qu'en ce qu'il est plus rapide, assez rapide pour que nous le percevions comme son. Si vous pouviez percevoir au moyen de l'oreille que le baromètre a baissé aujourd'hui de 5^{mm}, cette variation serait un son. Mais personne ne perçoit au moyen de l'oreille les mouvements du baromètre, et pour personne ces mouvements ne constituent des sons. Mais si la même variation de pression se produisait subitement autour de nous, si d'une manière quelconque, une variation du baromètre atteignant $\frac{1}{4}$ de centimètre se produisait dans l'espace de $\frac{1}{1000}$ de seconde, cette variation nous affecterait tout à fait comme un son. Une élévation soudaine du baromètre produirait un son analogue à celui que j'ai fait naître en battant des mains. Quelle est la différence entre un bruit et un son musical? Le son musical est un changement de pression régulier et périodique. Il est dû à des alternatives d'accroissements et de diminutions de pression, assez rapides pour que nous les percevions comme un son, et se produisant périodiquement avec une régularité parfaite. Les bruits ne sont pas nettement séparés des sons musicaux. Les sons musicaux peuvent, au moins quelquefois, se résoudre en bruits, ou avoir une tendance trop marquée à devenir des bruits pour satisfaire complètement une oreille délicate. Toute rudesse, toute irrégularité, toute altération de l'égalité des périodes produit l'effet d'une musique fausse, ou si compliquée qu'il est impossible de dire si elle est juste ou non.

Et maintenant, à propos de ce sens du son, j'aimerais à dire un mot des enseignements pratiques qui découlent des grands traités mathématiques présentés à l'Association Britannique, dans les discours de son président, le professeur Cayley, et du président de la Section de Mathématiques et

de Physique, le professeur Henrici. Ces deux professeurs insistent sur l'importance des représentations graphiques, et, relativement à cette qualité essentielle du son [1], on peut indiquer une illustration graphique du discours du professeur Cayley [2]. Pour employer le langage des Mathématiques, nous avons affaire, avec le son, à une fonction « d'une seule variable indépendante ». Le temps est la variable indépendante, la pression de l'air est la fonction. Il n'y a pas ici la complication qui serait due à des mouvements dans des directions diverses. Il n'y a pas la complication dont j'aurai à m'occuper tout à l'heure en parlant du sens de la force, complication relative au point d'application et à la direction de la force. Nous n'avons pas les complications infinies que nous rencontrerons dans quelques-uns des autres sens, celui du goût et celui de l'odorat notamment. Nous n'avons à considérer qu'une seule chose, à savoir la pression de l'air, et les variations qu'elle éprouve avec le temps. Ne croyez pas que les Mathématiques soient âpres, épineuses, ou qu'elles répugnent au sens commun. Elles sont simplement l'idéalisation du sens commun. La fonction d'une variable indépendante qu'on doit considérer est la pression de l'air sur le tympan. Eh bien, dans un millier de comptoirs et de bureaux d'affaires à Birmingham, à Londres, à Glasgow, à Manchester, on se sert journellement d'une courbe, comme l'a indiqué le professeur Cayley, pour montrer à l'œil une fonction d'une variable indépendante. La fonction d'une variable indépendante la plus importante à Liverpool est peut-être le prix du coton. Une courbe montrant le prix du coton, s'élevant quand ce prix est élevé, s'abaissant quand il est bas, montre à l'œil toutes les variations si complexes de cette fonction. De même, dans les Tables de mortalité du Bureau de la Statistique générale, des courbes montrent le nombre quotidien des décès; la douloureuse histoire d'une épidémie est écrite dans une branche qui s'élève et dans l'inclinaison faible et graduelle d'une branche qui s'abaisse, quand l'épidémie est passée, et

---

(1) La régularité dans la période. (P. L.)

(2) *British Assoc. Report for* 1883.

qu'on revient à l'état sanitaire normal. Tout cela est montré à l'œil; et l'un des plus beaux résultats des Mathématiques est le moyen de montrer à l'œil la loi de variation, quelque compliquée qu'elle soit, d'une fonction d'une variable indépendante. Mais j'arrive maintenant à ce qui me paraît être réellement la merveille des merveilles : songez à la complexité de l'effet produit par un orchestre qui joue (un orchestre de cent instruments), et deux cents voix qui chantent en chœur, accompagnées par l'orchestre. Songez à l'état de l'air; songez combien il est déchiré quelquefois, par un effet compliqué. Songez aux augmentations et aux diminutions douces et graduelles, bien qu'elles se produisent plusieurs centaines de fois par seconde, que subit la pression quand vous entendez un morceau de belle harmonie! Et cependant, qu'il y ait une seule note du son le plus doux d'une flûte, ou l'harmonie la plus pure de deux voix chantant parfaitement juste; ou qu'il y ait le fracas d'un orchestre, et les notes élevées, quelquefois perçantes et déchirantes, qu'on peut entendre se détacher sur le chœur, tout cela, songez-y, n'est pas trop compliqué pour que le professeur Cayley ne puisse le représenter, en dessinant sur le tableau noir un simple trait avec un morceau de craie. Une simple courbe, dessinée de la même manière que celle des prix du coton, représente tout ce que l'oreille peut entendre dans l'exécution musicale la plus compliquée. En quoi un son est-il plus compliqué qu'un autre? Simplement en ce que, dans les sons compliqués, les variations de notre fonction d'une variable indépendante, la pression de l'air, sont plus brusques, plus soudaines, moins douces et moins nettement périodiques que dans un son plus doux, plus pur et plus simple. Mais la superposition des différents effets est véritablement une merveille des merveilles; et pensez que tous ces effets différents, produits par tous ces instruments différents, peuvent être représentés ainsi par une simple ligne! Suivez bien ceci. Chacune des personnes présentes sait, je le suppose, ce que c'est qu'une partition musicale; vous connaissez, du moins, l'aspect des notes de l'air d'un hymne, et vous pouvez vous figurer pareille chose pour un chœur de voix, avec accompagnement

d'orchestre : figurez-vous une page entière d'une telle partition, avec une portée pour chacun des instruments, et peut-être quatre portées différentes pour quatre parties vocales. Songez à tout ce qu'il faut écrire sur une page du manuscrit de la partie gravée, pour indiquer ce qu'ont à faire les différents exécutants. Songez encore à tout ce qu'il faut faire de plus que ce que le compositeur a pu écrire. Songez à l'expression que chaque artiste est capable de donner, et à la différence entre un grand violoniste et une personne qui se borne à faire convenablement sa partie; pensez encore aux différences dans le chant, et à toute l'expression que le chanteur peut mettre dans une note ou une suite de notes, et que la notation ne peut indiquer. Il y a, sur la page manuscrite ou imprimée, un petit signe en forme d'angle indiquant un *diminuendo*, et un signe tourné en sens contraire indiquant un *crescendo;* c'est tout ce que le compositeur peut mettre sur le papier pour marquer les différences d'expression. Eh bien, tout ce qui peut être représenté par une page entière ou par deux pages d'une partition d'orchestre, indiquant les sons qui doivent être émis en dix secondes de temps, par exemple, est montré à l'œil avec une clarté parfaite, par une simple courbe tracée sur un ruban de papier de $2^m,50$ de longueur (1). Voilà, à mon avis,

---

(1) La courbe ainsi tracée en dirait même trop, car elle montrerait à qui saurait la lire, non seulement les périodes et les intensités de tous les sons simples dont la superposition constitue le son très complexe entendu à chaque instant, mais aussi les phases relatives de ces différents sons; et il semble bien que notre oreille ne soit pas capable de percevoir ces phases, mais seulement les périodes et les intensités; car, outre les preuves expérimentales directes fournies par Helmholtz (*Théorie physiologique de la Musique,* trad. Guérout, p. 159), il suffit de remarquer que ces phases sont nécessairement différentes pour les différents auditeurs d'une même salle, qu'elles changent suivant que tel ou tel musicien s'assied un peu plus près ou un peu plus loin, et que d'ailleurs il n'existe actuellement ni pour l'ensemble de l'orchestre, ni même pour un instrument unique à sons multiples, aucun moyen de régler les phases relatives des divers sons simultanés, et que pourtant l'impression produite par un accord déterminé de sons simples (ut, mi, sol, au moyen de diapasons, par exemple), paraît bien entièrement définie par les noms des notes, c'est-à-dire par les périodes seules; car elle est certainement toujours la même quand on reproduit l'accord à diverses reprises, et les phases ne sont certainement pas les mêmes. (M. B.).

une admirable preuve de la puissance des Mathématiques. Qu'aucun des étudiants de cet Institut ne se laisse détourner un moment du cours de ses études mathématiques par la pensée que les grands mathématiciens pénètrent dans un royaume pourvu de quatre dimensions, où vous ne pouvez les suivre. Acceptez ce que le professeur Cayley, dans l'admirable discours dont j'ai déjà parlé, nous dit du beau et splendide pouvoir qu'ont les Mathématiques d'idéaliser et de condenser le sens commun, et vous ne serez pas découragés dans vos études mathématiques; vous serez plutôt ranimés en pensant à la puissance que les mathématiciens, dévouant leur vie entière à l'étude des Mathématiques, ont réussi à donner à cette merveilleuse Science.

J'ai avancé que la sensation du son a pour cause de rapides variations de pression. Je ferais bien d'entrer dans le détail, et de dire quelle doit être la rapidité de ces alternatives de passage de la plus forte à la plus faible pression et de retour à la plus forte, et quelle doit être la fréquence de ce mouvement périodique ([1]), pour que nous ayons l'impression d'une note musicale. Si le baromètre varie une fois dans une minute, vous ne percevrez pas cette variation comme une note musicale. Mais supposez que par quelque action mécanique exercée dans l'air vous puissiez rendre beaucoup plus rapide la variation de la pression barométrique, de la pression de l'air. Ces variations de pression que le baromètre, à cause de sa trop grande lenteur à se mouvoir, ne peut montrer à l'œil, l'oreille les perçoit comme un son musical, si la variation périodique se reproduit 20 fois par seconde. Si elle se reproduit 30 fois, 40 fois ou 50 fois par seconde, on entend une note grave. Si la fréquence augmente graduellement, on entend la note s'élever graduellement; elle devient de plus en plus haute, de plus en plus aiguë, et si l'on arrive à 256 périodes par seconde on entend une certaine note appelée ordinairement *ut* en musique. Je crois être dans la vérité en vous la donnant comme l'ut le plus grave de la voix de ténor, l'ut le plus

([1]) *Voir*, pour la définition du mot fréquence, *Théorie ondulatoire de la lumière*, p. 197.



grave que puisse donner la flûte [1]. La note donnée par un tuyau d'orgue de 60^{cm} ouvert aux deux extrémités correspond à 256 périodes par seconde. Montez de plus en plus et arrivez à 512 périodes par seconde, et vous aurez l'ut au-dessus de celui-là, l'ut moyen de la voix de soprano. Allez à 1024, vous obtenez l'octave. Montez toujours d'une octave en doublant le nombre des vibrations par seconde, et si vous allez jusqu'à 5000, 6000 ou 10000 périodes environ par seconde, la note devient si perçante qu'elle cesse d'exciter l'oreille humaine, et que vous ne l'entendez plus. La note la plus élevée que puisse percevoir l'oreille humaine semble correspondre à 10000 périodes environ. Je dis *environ*, parce qu'il n'y a pas de limite bien définie. Certaines personnes cessent d'entendre une note qui devient de plus en plus aiguë, avant que d'autres ne cessent de l'entendre; par conséquent je peux seulement dire d'une manière très générale que 10000 périodes par seconde environ répondent à la note la plus aiguë que l'oreille humaine soit capable d'entendre. Nous pouvons donc définir les notes musicales comme des changements de pression de l'air, se reproduisant périodiquement de 20 fois à 10000 fois par seconde. Maintenant, y a-t-il, dans l'air, dans les solides élastiques, ou dans une matière quelconque affectant nos sens, des vibrations d'une fréquence aussi grande que 30000, 40000, 50000, 100000, un million par seconde? Il ne nous est pas démontré qu'il se produise dans la matière des vibrations dont le nombre dépasse beaucoup 10000, 20000 ou 30000 par seconde; cependant nous n'avons pas de raison de nier la possibilité de l'existence de ces vibrations, qui peut-être ont à remplir dans la nature une importante fonction. Mais si nous arrivons à un degré de fréquence auquel je ne puis assigner de valeur

---

[1] En France, où le *la* dit normal répond à 435 vibrations complètes ou périodes, l'ut désigné ici est l'ut de 261 vibrations. C'est également l'ut de la 4e corde du violon; bien des voix de ténor, toutes les voix dites de *fort ténor* notamment descendent aisément jusqu'à l'octave grave de cet ut (130 vibrations, 4e corde de l'alto); on trouve d'ailleurs cette note dans un grand nombre de mélodies écrites pour voix de ténor. (P. L.).

numérique, à quelque chose comme des centaines de mille, sinon des millions de vibrations par seconde, nous avons dépassé non seulement la limite des vibrations pouvant impressionner l'oreille humaine, mais encore, d'après nos connaissances actuelles, la limite des vibrations possibles de la matière. Le nombre des vibrations qui se propagent par ondes dans l'acier, l'air, l'eau, ne peut pas dépasser une certaine limite, à laquelle je ne puis actuellement assigner de valeur, mais qui doit être, à mon avis, estimée à quelques centaines de mille ou à quelques millions par seconde (¹).

Occupons-nous maintenant de la lumière. La sensation de la vue peut être comparée à la sensation du son à ce point de vue, qu'elle résulte aussi de la vibration d'une matière. La lumière, nous le savons, est une impression produite sur la rétine de l'œil, et par son intermédiaire sur le nerf optique; cette impression est produite par des vibrations dont le nombre est compris entre 400 millions de millions et 800 millions de millions par seconde environ. Il y a une vaste lacune entre les 400 vibrations par seconde qui correspondent aux notes élevées de la voix de ténor, et les 400 millions de millions qui correspondent à la lumière rouge sombre, la lumière la plus basse du spectre prismatique (²). Prenez le milieu

---

(¹) Par suite de la structure granulaire de la matière. Si l'on considère des longueurs d'onde de plus en plus petites, la période correspondante diminue d'abord, *passe par un minimum*, puis se met à croître indéfiniment. Les vibrations de période inférieure à ce minimum sont impossibles dans le milieu; en outre, quand la longueur d'onde ne comprend qu'un petit nombre de grains, la vitesse de propagation diminue, devient nulle pour une certaine longueur d'onde, et pour les longueurs d'onde inférieures, la propagation devient impossible. L'étude expérimentale de la dispersion des vibrations élastiques de longueur d'onde très petite ne semble pas absolument inabordable, et fournirait des renseignements du plus vif intérêt sur le degré d'homogénéité des matières étudiées; en particulier pour des cristaux bien purs, cela donnerait une idée de la grandeur de la maille. Dans les gaz sous des pressions très faibles pour lesquelles le chemin moyen atteint ou dépasse un centimètre, il y a lieu de s'attendre à une variation notable de la vitesse du son avec la période pour les longueurs d'onde de quelques centimètres. De même pour les dissolutions étendues d'un corps à très fort poids moléculaire, dans un liquide près de son point critique. Voir *La grandeur des atomes*, p. 119. (M. B.).

(²) *Voir* p. 99.



du spectre (la lumière jaune); le nombre des vibrations correspondantes est, en nombre rond, de 500 millions de millions par seconde. Dans la lumière violette, il y en a 800 millions de millions. Au-dessus, il y a une chose que l'œil perçoit à peine, qu'il ne perçoit pas du tout peut-être; je crois cependant qu'il la perçoit, quoique très faiblement; ce sont les rayons ultra-violets, qui nous sont connus principalement par leur action photographique, mais aussi par bien d'autres expériences admirables qui, dans les trente dernières années, ont étendu de la manière la plus merveilleuse nos connaissances sur la lumière. On rend visibles des rayons de lumière invisible en les faisant tomber sur une certaine espèce de verre, du verre coloré par de l'uranium, ce verre vert jaunâtre qu'on appelle quelquefois *canary glass* ou *chameleon glass*. Le verre d'urane a la propriété de rendre visibles pour nous les rayons invisibles. Vous pouvez tenir à la main un morceau de verre d'urane et l'éclairer au moyen de cette lumière électrique, ou d'une bougie, ou de la lumière du gaz, ou bien le maintenir dans le spectre prismatique de la lumière blanche; vous le verrez acquérir un éclat dépendant de la couleur de la lumière qui le frappe; mais placez-le dans le spectre au delà de l'extrémité violette, là où en son absence vous ne voyez rien, où un morceau de craie paraît tout à fait noir, et le verre d'urane émet une lueur opaline et mystérieuse d'une belle teinte; il nous révèle la présence des rayons invisibles, en les transformant en rayons de plus basse période, et les rendant ainsi visibles pour l'œil. La découverte de cette propriété du verre d'urane est due au professeur Stokes, qui lui a donné le nom de *fluorescence*, en souvenir du spath fluor dans lequel il a reconnu la même propriété. On a découvert depuis que la fluorescence et la phosphorescence sont reliées l'une à l'autre; ce sont les deux limites d'un même phénomène. Je suppose que la plupart des personnes ici présentes connaissent les peintures lumineuses obtenues au moyen des sulfures de calcium et d'autres substances, et qui, après avoir été exposées un certain temps à la lumière, continuent pendant des heures à émettre de la lumière dans l'obscurité. La persistance de

l'émission de lumière après la suppression de l'illumination, persistance qui caractérise ces objets phosphorescents, est manifestée aussi, comme l'a montré Ed. Becquerel, par le verre d'urane; la fluorescence découverte par Stokes se rattache ainsi d'une manière continue à ces phénomènes de phosphorescence depuis longtemps connus, et sur lesquels l'attention des savants semble avoir été appelée pour la première fois par Robert Boyle, il y a environ deux cents ans.

Il y a d'autres rayons, que nous ne percevons d'aucune de ces manières, mais que nous percevons par notre sens de la température : les rayons calorifiques, comme on les nomme ordinairement. Mais, en réalité, tous les rayons que nous appelons *lumineux* produisent des effets calorifiques. La chaleur rayonnante et la lumière sont une seule et même chose. Il n'y a pas deux agents distincts, la chaleur rayonnante et la lumière : la chaleur rayonnante est identique à la lumière. Placez dans une chambre noire une bouilloire chaude, et regardez-la. Vous ne la verrez pas. Tenez près d'elle votre visage ou votre main, et vous la sentez par ce que Bunyan aurait appelé la *porte du toucher* (1); mais aujourd'hui nous appliquons le mot sentir aux autres sens aussi bien qu'au toucher. Vous sentez la bouilloire avant de la toucher. Vous la sentez avec le dos ou avec la paume de votre main; vous la sentez certainement avec votre visage, et avec votre œil, et cependant vous ne la voyez pas. Eh bien, ai-je besoin de justifier cette assertion, que ce que vous percevez n'est pas de la lumière? Vous dites que ce n'est pas de la lumière, et ce n'en est pas pour vous, si vous ne le voyez pas. Il s'est élevé à ce sujet beaucoup de discussions, au point de vue de la logique. Notre définition ressemble à un cercle vicieux. Nous pouvons commencer par définir ainsi la

---

(1) *Feel Gate.* Dans le texte anglais il y a une opposition entre les mots *feel* et *perceive*, entre la perception transformée par le cerveau et l'impression produite sur les terminaisons nerveuses. Cette opposition est du même genre que celle qui a été signalée (p. 167, note) entre *feel* et *touch*. Nous avons dû traduire les deux mots *feel* et *perceive*, par le même mot *sentir*, à défaut d'un autre exprimant nettement et correctement la pensée de l'auteur. Le lecteur, avec ces explications, la dégagera aisément. (P. L.).



lumière : « c'est de la lumière si vous la voyez en tant que lumière ; ce n'est pas de la lumière, si vous ne la voyez pas ». Pour éviter les circonlocutions, nous prendrons les choses de cette manière. La chaleur rayonnante est de la lumière si nous la voyons, et n'est pas de la lumière si nous ne la voyons pas. Cela ne veut pas dire qu'il y ait deux choses différentes; cela signifie qu'il y a plusieurs qualités de chaleur rayonnante. Il y a des qualités de chaleur rayonnante que nous pouvons voir, et si nous les voyons nous les appelons *lumière;* il y a des qualités de chaleur rayonnante que nous ne pouvons voir, et si nous ne pouvons pas les voir nous ne les appelons pas lumière, mais nous les appelons encore *chaleur rayonnante :* et en somme, cela me paraît être la meilleure logique applicable au sujet.

Soit dit en passant, je ne vois pas figurer la Logique sur les programmes d'études de *Birmingham and Midland Institute.* La Logique est au langage et à la grammaire ce que sont les Mathématiques au sens commun; la Logique est de la grammaire idéalisée. J'espère que les étudiants déjà avancés dans l'étude de la grammaire, du latin et du grec, et qui ont besoin de la Logique autant peut-être, sinon plus, que la plupart des étudiants en sciences et en langues modernes, vont se perfectionner dans la Logique, et la considérer comme la Science de l'usage des mots, comme la Science qui les amènera à savoir exactement ce qu'ils entendent par les mots qu'ils emploient. Une mauvaise logique a causé plus de naufrages que l'ignorance. Quand un capitaine écrit sur son livre de loch : le vaisseau occupe telle position, il veut dire que c'est la position la plus probable, celle qu'il croit la plus probable d'après les observations précédentes. Cela fait, et en supposant qu'il n'ait vu ni le Soleil, ni les étoiles, ni aucune terre, des observations exactes de la vitesse et de la direction lui indiqueront par un simple calcul (dont le nom technique est *estime*) la position du vaisseau le jour suivant. Mais les marins oublient trop souvent que ce qu'ils ont noté sur le livre de loch n'était pas la position vraie du vaisseau, mais bien sa position la plus probable, d'après les données qu'ils possédaient à ce moment, et ils continuent

leur route comme si c'était la position exacte. Ils oublient le sens des mots mêmes qu'ils ont inscrits sur leur livre, et cette mauvaise logique a précipité sur les rochers plus de bateaux qu'aucune autre négligence ou ignorance en matière nautique. C'est une mauvaise logique qui conduit à se fier à l'estime, dans un voyage sur mer; et c'est cette mauvaise logique qui est la cause de ces naufrages terriblement fréquents de steamers qui, bien conduits d'ailleurs, se précipitent sur des écueils à la fin d'un long voyage, par un temps couvert, mais parfaitement beau. Vous rendre capables de comprendre exactement le sens de vos résultats quand vous prenez quelque note se rapportant à vos recherches ou à vos expériences, et de comprendre exactement le sens de ce que vous notez, tel est le rôle de la Logique. Disposer votre registre de telle manière que si vous le regardez dans la suite il vous apprenne ce que vous y cherchez, c'est faire de la logique pratique ni plus ni moins; et si vous vous conformez à cette logique pratique, vous en tirerez des avantages qui sont encore évidents, si vous ne faites que vous occuper d'un sujet scientifique ou pratique qui vous soit familier.

On risque donc de faire un mauvais emploi des mots, et par conséquent de faire de mauvais raisonnements, quand on parle de la lumière et de la chaleur rayonnante; mais si nous définissons nettement la lumière : ce que nous avons conscience de percevoir comme lumière, sans essayer de définir cette conscience, parce que nous ne pouvons pas plus la définir que nous ne pouvons définir le libre arbitre, nous serons à l'abri du danger. Il n'y a pas de discussion sur le fait même de la vision : si vous voyez, c'est de la lumière. Et maintenant, quand la chaleur rayonnante est-elle de la lumière? La chaleur rayonnante est de la lumière quand le nombre de ses vibrations est compris entre 400 millions de millions et 800 millions de millions par seconde. Quand la fréquence est inférieure à 400 millions de millions par seconde, ce n'est pas de la lumière. C'est de la chaleur rayonnante invisible, *infra-rouge*. Si la fréquence dépasse 800 millions de millions par seconde, ce n'est plus de la lumière, puisqu'on ne peut pas la voir; on a des radiations

ultra-violettes invisibles, véritable chaleur rayonnante; mais d'ordinaire on ne leur donne pas ce nom, leur effet thermique étant connu plutôt théoriquement que par le témoignage des sens, ou par des indications thermométriques ou thermoscopiques. Des observations qui ont réellement été faites par Langley et par Abney sur la chaleur rayonnante nous font descendre environ de trois octaves au-dessous du violet et nous pouvons espérer aller beaucoup plus bas encore, dans des observations à venir. Actuellement nous connaissons en tout quatre octaves de chaleur rayonnante environ, c'est-à-dire de 100 à 200, de 200 à 400, de 400 à 800, de 800 à 1600 millions de millions de vibrations par seconde. Une octave de chaleur rayonnante est perçue par l'œil comme lumière, c'est celle qui va de 400 à 800 millions de millions. Si j'emprunte le mot octave à la musique, ce n'est pas pour lui attribuer un sens mystique, ni pour indiquer une relation entre l'harmonie des couleurs et l'harmonie des sons. Il n'y a pas de relation de ce genre. J'emploie simplement le mot *octave* pour désigner brièvement toutes les radiations dont les fréquences sont comprises entre deux limites qui sont entre elles dans le rapport de 1 à 2. Si vous doublez la fréquence d'une note de musique, vous l'élevez d'une octave; c'est dans ce sens, et non dans un autre, que j'applique pour l'instant le mot octave à la lumière. Et maintenant, songez quel effrayant abîme sépare ces 100 millions de millions de vibrations par seconde, correspondant à la note la plus basse de chaleur rayonnante qui ait été découverte jusqu'ici, et les 10000 vibrations par seconde, limite supérieure des vibrations qu'on peut percevoir comme son. C'est une région inconnue de la Science : l'étude des vibrations comprises entre ces deux limites est peut-être une de celles qui promettent le plus de résultats aux observateurs à venir ([1]).

([1]) La décharge d'une bouteille de Leyde à travers une bobine de fil très fin et très long donne naissance à des vibrations électromagnétiques, dont les périodes, déterminées par Helmholtz (1869) et après lui par bien d'autres observateurs, peuvent être comprises entre $\frac{1}{1000}$ et $\frac{1}{10000}$ de seconde pour les appareils usuels. Tout récemment M. Hertz (1888) a réussi à reproduire des vibrations de même nature dont les périodes sont d'environ $\frac{1}{100000}$ de seconde, et à en étudier la pro-

Pour conclure, je désire développer cette idée, que tous les sens sont liés à la force. La sensation du son est simplement, comme nous l'avons vu, la sensation de variations très rapides de la pression de l'air, qui est une force, sur le tympan de l'oreille. Je me suis contenté de nommer le sens du goût et de l'odorat. Je peux dire que ce sont des sens chimiques. Goûtez du sel ordinaire et goûtez du sucre, vous direz en un instant la différence, et la perception de cette différence est la perception d'une qualité chimique. Il y a, dans cette perception, une influence moléculaire subtile, due au contact de l'objet avec la langue ou le palais, et déterminant une sensation très différente de celles qu'on regarde ordinairement comme des sensations tactiles, le tact, comme nous l'avons vu, ne nous permettant d'apprécier que la rudesse et la température. Le plus subtil de tous nos sens est peut-être celui de la vue; ensuite viennent l'odorat et le goût. Le professeur Stokes me disait récemment qu'il regarderait volontiers le goût, l'odorat et la vue comme connexes, parce qu'ils sont tous trois moléculaires (tous trois ont affaire aux propriétés de la matière envisagées non dans leurs manifestations générales, mais dans leurs actions moléculaires), et qu'il les grouperait tous trois ensemble, plutôt que de rapprocher aucun d'eux de l'un des autres. Nous ne sommes pas obligés, d'ailleurs, de réduire les six sens à un seul, mais je voudrais mettre en lumière la relation qu'ils ont tous avec la force. L'action chimique est une force qui scinde les molécules, les jette ou les pousse les unes vers les autres : notre sens ou nos sens chimiques peuvent donc, en cela au moins, être regardés comme se rapportant à la force. Que le sens de l'odorat et celui du goût soient reliés l'un à l'autre, cela paraît évident; et si les physiologistes me le permettaient, je dirais qu'ils peuvent, sans que cela paraisse cho-

---

pagation. Ces vibrations se propagent dans le vide, ce qui les distingue des vibrations sonores, qui ne se propagent que dans la matière ordinaire, et avec une vitesse tellement voisine de la vitesse de la lumière qu'il paraît tout à fait raisonnable de les considérer comme de nature identique aux vibrations de la chaleur rayonnante, conformément aux idées émises par Maxwell (1867) et rappelées par Sir W. Thomson dans une autre Conférence (p. 59). (M. B.).

quant, être considérés comme les limites d'un même sens. Au moins, peut-on dire qu'il est possible de les comparer, ce qu'on ne peut dire de deux quelconques des autres. On ne peut dire que la forme d'un cube, ou la rugosité d'un morceau de sucre ou d'un morceau de grès, soient comparables à la température de l'eau chaude, ou au son d'une trompette; ou que le son d'une trompette ressemble à la couleur écarlate, ou à une fusée ou à un fanal bleu. Il n'y a pas de comparaison possible entre ces diverses sensations. Mais si quelqu'un disait : « La saveur de ce morceau de cannelle ressemble à son odeur », je crois qu'il exprimerait un fait reconnu par tout le monde. L'odeur et la saveur du poivre, de la noix muscade, des clous de girofle, de la cannelle, de la vanille, des pommes, des fraises et autres mets, particulièrement des épices et des fruits, ont des caractères très marqués, dans lesquels le goût et l'odeur paraissent essentiellement comparables. Bien que les anatomistes distinguent le sens du goût de celui de l'odorat, parce que les organes intéressés sont différents, et qu'on n'a pas découvert de continuité entre ces organes, je crois qu'au point de vue philosophique on n'aurait pas tort de les regarder comme les limites d'un même sens (une même espèce de perceptivité), le sens d'une qualité chimique essentiellement relative à nos organes.

Mais la sensation de lumière et la sensation de chaleur sont très différentes, bien que nous ne puissions pas définir leur différence. Vous percevez la chaleur d'une bouilloire chaude, mais comment? Grâce à la chaleur rayonnante qui atteint votre visage; voilà une manière. Mais il y en a une autre, où la chaleur rayonnante n'a rien à voir, et dont je parlerai plus tard. Vous percevez un corps chaud par la vision, mais grâce aussi à la chaleur rayonnante; s'il est frappé par la lumière ou assez chaud pour être lumineux par lui-même, vous le voyez : vous pouvez en même temps et voir un corps chaud, et avoir conscience de sa présence autrement qu'en le voyant, grâce à la chaleur qu'il émet. Prenez avec les pincettes un morceau de charbon incandescent, ou prenez un tisonnier chauffé au rouge, et étudiez-le; portez-le dans une chambre noire, et regardez-le. Vous le voyez pendant un cer-

tain temps; puis vous cessez de le voir, mais vous sentez encore la chaleur qu'il rayonne. Eh bien, pendant tout ce temps, l'œil, le visage et les mains perçoivent la chaleur rayonnante; mais le sens de la température est seul en jeu quand le corps cesse d'être rouge. Pour nos sens, il y a donc deux manières absolument distinctes de percevoir des choses qui, en dehors de nous, sont de même nature et continues, savoir la variété visible et la variété invisible de chaleur rayonnante. Elles exercent sur nos sens des actions que je ne puis demander aux anatomistes de considérer comme étant les mêmes dans les deux cas. Ils ne peuvent pas dire, du moins aujourd'hui, qu'il y ait continuité absolue entre la rétine de l'œil percevant cette chaleur rayonnante comme lumière, et la peau de la main percevant cette chaleur rayonnante comme chaleur. Nous pourrons arriver à en savoir plus long; peut-être même découvrira-t-on là une continuité. Quelques-unes des sublimes spéculations de Darwin peuvent devenir pour nous des réalités; et nous pouvons arriver à reconnaître sur toute la surface du corps les germes d'une rétine qu'il sera possible de cultiver. Nous n'y sommes pas encore parvenus (1), mais la grande idée de Darwin nous

(1) Chez certains animaux inférieurs dépourvus d'organe spécial affecté à la vision, l'épiderme, sur une portion plus ou moins étendue de sa surface, est sensible à l'excitation lumineuse; la structure des portions sensibles présente une analogie réelle avec la structure de la rétine des vertébrés. Un mollusque marin, la pholade, est dans ce cas; l'épiderme de toute la portion du manteau qui dépasse la coquille est une véritable rétine permettant à l'animal non seulement de distinguer la lumière de l'obscurité, mais de saisir dans la lumière qui le frappe des différences d'intensité et même de couleur; la sensation se traduit par une rétraction plus ou moins brusque de la portion sensible, sorte de doigt qui dépasse la coquille, et qu'on appelle le *siphon;* les radiations ultra-violettes et les radiations infra-rouges n'ont pas d'action sur l'épiderme du siphon. *Voir* à ce sujet : R. Dubois, *Nouvelle théorie du mécanisme des sensations lumineuses* (*Revue générale des Sciences pures et appliquées*, t. I, p. 198). (P. L.).

N.-B. — Il est encore difficile de décider s'il s'agit d'une sensation visuelle ou simplement d'une sensation thermique. Un corps quelconque n'est sensible qu'à sa propre température, et pour être sensible aux radiations comprises entre des limites déterminées, par *la chaleur* qu'elles produisent, il suffit que le tissu exerce une absorption *thermique sélective* sur ces radiations mêmes et soit tout à fait diathermane pour les autres. (M. B).



suggère cette autre, qu'il peut y avoir une continuité absolue entre la perception de la chaleur rayonnante par la rétine de l'œil, et sa perception par les tissus et les nerfs qu'intéresse la simple sensation de température. Il faut cependant nous contenter, en attendant, de faire une distinction entre le sens de la lumière et le sens de la chaleur. Tenez votre main au-dessous d'un tisonnier chauffé au rouge et placé dans une chambre obscure : c'est uniquement la chaleur rayonnée par lui qui vous fait sentir qu'il est chaud; c'est aussi grâce à elle que vous le voyez. Placez maintenant la main au-dessus de lui, vous sentez plus de chaleur. En réalité, vous percevez alors sa chaleur sous trois formes : contact de l'air qui s'élève après avoir été échauffé par le tisonnier, chaleur rayonnante perçue par l'intermédiaire de votre sens de la température, chaleur rayonnante perçue comme lumière (le tisonnier de fer étant encore rouge). Mais la nature de cette sensation de chaleur est constamment la même, c'est un certain effet éprouvé par le tissu, que sa cause soit la chaleur rayonnante ou le contact avec des particules d'air échauffé.

Il reste enfin, et j'ai peur d'avoir déjà trop abusé de votre patience, le sens de force. J'ai été vivement attaqué pour avoir affirmé l'existence de ce sixième sens. Je ne veux ni reprendre la controverse, ni essayer de vous expliquer sur quoi reposaient ces attaques; je ne le pourrais pas d'ailleurs, car en les lisant je n'ai pu le comprendre moi-même. Le seul fondement réel des objections était peut-être qu'un écrivain a publié cette théorie à New-York, en 1880. J'avais cité le D[r] Thomas Reid, sans donner de date. Cette date peut être 1780 ou à peu près. Mais les physiologistes se sont très énergiquement refusés à admettre que le sens de la rugosité fût le même que le sens musculaire, thèse soutenue par les métaphysiciens qui ont succédé à l'Université de Glascow au D[r] Thomas Reid. C'est à l'Université de Glascow que j'ai étudié le sens musculaire, et je n'ai pas vu qu'on en ait parlé bien nettement ailleurs. Qu'est-ce que ce *sens musculaire?* J'appuie ma main droite sur le bureau placé devant moi, ou j'avance en étendant ma main dans l'obscurité et employant

ce moyen pour trouver ma route, comme les aveugles le font constamment pour savoir où ils sont, et se guider par le sens du toucher. Je marche jusqu'à ce que la présence d'un obstacle me soit révélée par une sensation de force sur la paume de la main. Comment et où perçois-je cette sensation? Les anatomistes vous diront que c'est dans les muscles du bras. Il y a donc là une force que je perçois dans les muscles du bras, et la faculté de la percevoir est ce qu'on nomme assez exactement un *sens musculaire*. Mais maintenant frottez avec le bout de votre doigt un morceau de grès ou un morceau de sucre, ou une table polie. Prenez entre le doigt et le pouce un morceau de sucre et prenez de la même manière un morceau de verre poli. Vous sentez une différence. Qu'est-ce que cette différence? C'est la sensation de rugosité, opposée à la sensation de poli. Les physiologistes et les anatomistes ont employé, pour la désigner, le mot de sensation *tactile*. J'avoue que cela ne dit pas grand chose à mon esprit. *Tactile* désigne simplement « ce qui est l'objet du tact, ou qui a rapport au tact », et en disant que nous percevons la rugosité et le poli par une sensation tactile, nous en sommes exactement au point où nous en étions. Nous ne sommes pas plus avancés en disant qu'il y a un sens tactile, constituant une subdivision de notre sens du toucher. Mais je dis que le sens en question est un sens de force. Nous ne pouvons faire autrement que de l'admettre; c'est un sens de force, de directions de forces, et de points d'application de forces. Si les points d'application des forces sont les paumes des mains, nous éprouvons une sensation correspondante, et nous savons que nous percevons, dans les muscles des bras, les effets de fortes pressions exercées sur les paumes des mains. Mais si les points d'application sont répartis sur une centaine de petites surfaces appartenant à un doigt, nous percevons encore l'effet comme une force. Nous distinguons entre une force uniformément distribuée, comme celle que développe un morceau de verre poli, et des forces distribuées sur dix ou cent petites surfaces. C'est en cela que consiste le sens du poli et de la rugosité. La sensation de rugosité est donc une sensation de forces, et de points d'application de forces, tout

comme la sensation de forces s'exerçant sur les deux mains étendues est la sensation de forces appliquées en deux points distants de $1^m,80$. Que les points d'application soient éloignés de $1^m,80$ ou de $\frac{1}{10}$ de millimètre, c'est à un sens de force, et de points d'application de forces, et de directions de forces que nous avons affaire avec cette subdivision du sens du toucher qui n'est pas le sens de la température. Les anatomistes et les physiologistes ont le droit d'établir une distinction entre l'espèce d'excitation du tissu des doigts et des nerfs très fins de la peau du doigt et des couches sous-jacentes grâce à laquelle nous percevons, dans le premier cas, la rugosité et le poli, et celle des muscles qui nous fait percevoir, dans le second cas, des points d'application très éloignés. Mais, que les forces soient appliquées en des points trop voisins pour que les anatomistes puissent distinguer et indiquer les muscles qui résistent aux forces et les équilibrent, ou qu'elles soient appliquées en des points très éloignés et évidemment équilibrées par les muscles des deux bras, on perçoit des impressions de même nature. Il faut se rappeler, en effet, que lorsqu'on prend dans les doigts un morceau de verre, chaque pression élémentaire exercée par le verre sur chaque millième de millimètre de la surface du doigt est une force équilibrée. Les anatomistes ne nous désignent pas les muscles qui équilibrent les forces supportées séparément par les petites surfaces du doigt lui-même quand nous touchons un morceau de verre poli, ou les forces exercées individuellement par les vingtaines ou les centaines de petites surfaces quand on touche un morceau de sucre ou de grès rugueux; et peut-être n'est-ce pas sur des muscles plus petits que les muscles du doigt pris dans leur ensemble que s'exerce cette multitude de forces; peut-être, d'autre part, ces nerfs et ces tissus présentent-ils, dans leurs propriétés, une certaine continuité avec les muscles. Je dépasse les limites de mon sujet quand je parle des muscles et des nerfs; mais, au point de vue extérieur, le sens du toucher (autre que celui de la température) est le même dans tous les cas : c'est un sens de forces, de points d'application de forces,

et de directions de forces (1). J'espère avoir maintenant justifié l'existence du sixième sens; j'espère aussi que je n'aurai pas trop lassé votre patience pour ne l'avoir pas fait en moins de mots.

---

(1) Ce sens de la force, sous ses deux formes, n'est-il pas plutôt un sens de l'effort exercé par les muscles, de la fatigue qu'ils éprouvent, et du commandement volontaire qu'il faut continuer à leur transmettre pour qu'ils exercent le même effort ? Pour le sens de la rugosité et du poli, que possèdent toutes les parties de la peau, même celles pour lesquelles deux pointes d'aiguille assez écartées ne donnent qu'une sensation unique, il me semble que c'est bien une sensation musculaire de même genre encore si l'on veut, ou de direction de force, résultant de la notion, plus ou moins confuse, des groupes de muscles différents qu'il faut mettre en jeu pour produire ou empêcher un glissement, avec plus ou moins d'énergie suivant que le corps est plus ou moins rugueux, ajoutant ainsi à la notion de pression normale celle du frottement au repos. (M. B.).

VIII.

LA THÉORIE ONDULATOIRE DE LA LUMIÈRE.

CONFÉRENCE FAITE A L'ACADÉMIE DE MUSIQUE, A PHILADELPHIE, SOUS LES AUSPICES DE L'INSTITUT FRANKLIN, LE 29 SEPTEMBRE 1884.

Son et lumière; vibrations sonores et vibrations lumineuses, leur fréquence. — Radiations calorifiques; radiations actiniques; étendue du spectre visible. — Grandeur des forces en jeu dans les vibrations lumineuses : l'éther et ses propriétés mécaniques. — La polarisation de la lumière; polarisation rectiligne; polarisation circulaire; polarisation elliptique. — Diffraction de la lumière; réseaux; mesure des longueurs d'onde. — La couleur du ciel.

Heureusement pour moi le sujet dont je vais vous entretenir ce soir n'est pas inconnu à Philadelphie. Les belles conférences sur la lumière faites il y a quelques années par le président Morton, de l'Institut Stevens, et la série de conférences accompagnées d'expériences si admirables, qu'a données sur le même sujet le professeur Tyndall et que beaucoup d'entre vous ont suivies, vous ont bien préparés à entendre tout ce que je pourrai vous dire ce soir à propos de la théorie ondulatoire de la lumière.

Mon humble mission est en effet de vous donner seulement quelques détails mathématiques et dynamiques au sujet de cette grande théorie. Je n'aurai pas le plaisir d'illustrer ces détails par quelque chose de comparable à ces belles et instructives expériences, qu'un grand nombre d'entre vous ont déjà vues. Il me suffit de savoir que beaucoup d'entre vous sont si complètement préparés à comprendre tout ce que je pourrai dire, que ceux qui ont vu les expériences ne s'apercevront pas ce soir de leur absence. Je désire en même temps rendre ces détails intelligibles à ceux qui n'ont pas eu l'avan-

tage d'assister à une série systématique de conférences. Je dois dire d'abord, sans plus de préambule, car le temps dont je dispose est court et le sujet est long, que le son et la lumière sont dus tous deux à des vibrations qui se propagent à la manière des vagues; et j'essayerai de définir en premier lieu le mode de propagation et le mode de mouvement qui donnent naissance aux phénomènes affectant deux de nos sens, celui du son et celui de la lumière.

Le son et la lumière sont dus à des vibrations, mais les vibrations lumineuses diffèrent grandement des vibrations sonores. Ce que je peux vous dire de plus simple au point de vue dynamique ou mathématique au sujet de ces deux classes de vibrations, c'est qu'il y a une grande différence entre la fréquence des vibrations lumineuses et la fréquence des vibrations sonores. Le terme *fréquence* appliqué aux vibrations est d'un usage commode; il a été employé par Lord Rayleigh, dans son livre sur le son, pour désigner un nombre déterminé de vibrations complètes exécutées par un corps vibrant dans l'unité de temps. Considérez donc, à propos du son, la fréquence des vibrations des notes qui, comme vous le savez, sont représentées par les syllabes *do*, *ré*, *mi*, etc. Les notes de l'échelle musicale correspondent à différentes fréquences de vibrations. Une certaine note correspond à un certain nombre de vibrations par seconde, et son octave au double.

Je peux tout d'abord vous expliquer facilement ce qu'est la note appelée *do*; je parle du do moyen; je crois que c'est le do de la voix de ténor qui approche le plus des sons que l'on emploie en parlant. Cette note correspond à 256 vibrations complètes par seconde [1], 256 mouvements de va-et-vient par seconde de temps.

Représentez-vous une vibration par seconde de temps. Le pendule à secondes de l'horloge exécute une vibration en deux secondes, ou une demi-vibration, c'est-à-dire un mouvement dans un seul sens, dans une seconde. Prenez le balancier de 25^{cm} d'une pendule de cheminée, qui vibre deux

---

[1] *Voir* la note, p. 182.

fois plus vite que le balancier d'une pendule à poids ordinaire; il exécute une vibration par seconde, un mouvement complet de va-et-vient dans une seconde. Je peux facilement donner un mouvement de va-et-vient à ma main trois fois par seconde, et cinq fois au moyen d'un violent effort. Avec une force quatre fois plus grande, si je pouvais la développer, je pourrais mouvoir ma main deux fois plus vite, ou dix fois en une seconde.

Imaginons donc un bras excessivement musculeux, qui ferait vibrer la main dix fois par seconde, c'est-à-dire la ferait aller dix fois à gauche, et dix fois à droite. Figurez-vous deux fois dix mouvements semblables, ou vingt mouvements par seconde, ce qui exigerait quatre fois autant de force; trois fois dix, ou trente mouvements par seconde, exigeraient neuf fois autant de force. Si un homme avait neuf fois autant de force qu'en peut avoir le bras le mieux musclé, il pourrait faire exécuter à sa main trente vibrations complètes par seconde (une vibration complète comprenant deux mouvements de sens contraire) et, sans le secours d'aucun instrument de musique, produire par le seul mouvement de sa main une note musicale qui correspondrait à l'une des pédales de l'orgue.

Si vous voulez connaître la longueur d'un tuyau du pédalier, vous pourrez la calculer de la manière suivante. Il y a quelques nombres qu'il faut retenir, entre autres celui-ci. Dans ce pays, vous partagez l'isolement des Anglais au point de vue des poids et mesures; vous employez le pied, le pouce et le yard. Je suis obligé d'employer ce système et je vous en demande pardon, parce qu'il est très incommode; j'espère que tous les Américains feront tout ce qu'ils pourront pour introduire chez eux le système métrique français. J'espère qu'on pourra réparer la mauvaise action commise par un ministre anglais dont je tairai le nom, parce que je ne veux jeter l'opprobre sur personne. Il abrogea une loi utile, qui fut suivie pendant quelque temps et qui, je l'espère, sera bientôt rétablie, d'après laquelle le système métrique français devait être enseigné dans toutes nos écoles nationales. Je ne sais pas comment on fait en Amérique. L'organisation scolaire me semble tout à fait admirable et j'espère que l'en-

seignement du système métrique ne sera pas plus abandonné dans les écoles américaines que l'usage des globes terrestres. Je le dis sérieusement : je ne crois pas que personne sache combien je parle sérieusement de ceci. Je considère notre système anglais comme un méchant casse-tête, un reste d'esclavage dont nous souffrons. La raison qui nous fait continuer de l'employer est la difficulté imaginaire d'effectuer le changement, pas autre chose; mais je ne crois pas qu'en Amérique il puisse s'élever une pareille difficulté, à propos de l'adoption d'une réforme aussi utile.

Je connais la vitesse du son en pieds par seconde. Si j'ai bonne mémoire, elle est de 1089 pieds par seconde dans l'air sec et à la température de fusion de la glace, et de 1115 pieds par seconde dans l'air dont la température peut être appelée moyenne, 15° ou 16° (je ne sais pas si cette température est quelquefois atteinte à Philadelphie, ou si elle ne l'est jamais, je n'en ai pas fait l'expérience, mais on me dit qu'il y a quelquefois 15° ou 16° à Philadelphie, et je le crois); prenons en nombre rond, 1000 pieds par seconde. Nous disons quelquefois que cette vitesse est de 1000 pieds musicaux par seconde ([1]); cela évite des complications dans le calcul de la longueur des tuyaux d'orgue; la durée de vibration d'un tuyau d'orgue (ouvert) est le temps que met une vibration à le parcourir d'un bout à l'autre, et à revenir à son point de départ. Dans un tuyau d'orgue de 500 pieds (170^m) de longueur, la période du son correspondrait à une vibration par seconde; dans un tuyau de 10 pieds ($3^m,40$), à 50 vibrations par seconde; dans un tuyau de 20 pieds ($6^m,80$) la période correspondrait, à ce compte, à 25 vibrations par seconde. Donc, des fréquences de 25 et 50 par seconde correspondraient à la vibration de

([1]) Le pied anglais vaut $0^m,3048$; 1089 pieds correspondent à $331^m,92$ et 1115 à $339^m,84$, soit 332^m et 340^m; le nombre adopté en France pour la vitesse à 0° est 331. Le pied musical, d'après cela, vaut donc $0^m,34$. Il est à peine besoin de faire remarquer, d'ailleurs, que ces nombres ne sont qu'approchés, la correction relative à l'embouchure devant toujours être faite quand on veut calculer la longueur d'un tuyau réel. Pour éviter des renvois trop fréquents, nous placerons entre parenthèses, à la suite des longueurs données en pieds dans le texte anglais, ces mêmes longueurs converties en mètres. (P. L.).



tuyaux d'orgue de 20 pieds et de 10 pieds (6^m,80 et 3^m,40).

La période de vibration d'un tuyau d'orgue ouvert aux deux bouts est approximativement le temps que met le son pour se propager d'une extrémité à l'autre et revenir à son point de départ. Vous vous souvenez que la vitesse du son produit dans un tuyau de 10 pieds (3^m,40) de long rempli d'air sec vaut un peu plus de cinquante fois la longueur d'onde de ce son; les vibrations du son dont la fréquence est 256 par seconde correspondent à celles d'un tuyau de 2 pieds de long (0^m,68). Considérons le son de 512 périodes par seconde, il correspond à un tuyau de 1 pied de long (0^m,34) environ. Dans une flûte, ouverte aux deux bouts, les trous sont disposés de telle façon que la longueur d'onde du son soit environ un pied, pour une des principales notes à registre ouvert. Les sons musicaux plus élevés correspondent à des fréquences de plus en plus grandes, soit 1000, 2000, 4000 vibrations par seconde; 4000 vibrations par seconde correspondent à une petite flûte de longueur excessivement faible; cette longueur serait 3^{cm},75. Figurez-vous le son d'un sifflet de chien, ou de tout autre sifflet, ou celui d'une petite clef forée dont le tube aurait un peu moins de 2 centimètres de longueur, vous aurez le son qui correspond à 4000 vibrations par seconde.

Une longueur d'onde sonore est la distance franchie par le son pendant la durée d'une vibration. Je vous ferai comprendre la nature des vibrations sonores en déplaçant, le long du dessin peint sur l'écran, cette pièce qui représente de l'air condensé. Un corps sonore détermine d'une manière continue des condensations et des raréfactions alternatives de l'air. Je lance vigoureusement ma main dans une direction; l'air au devant d'elle se condense, il se raréfie derrière elle. Si je la déplace dans la direction opposée, le phénomène est inverse; la condensation se propage à partir de l'endroit où ma main se meut successivement dans deux directions opposées. Chaque condensation est suivie d'une raréfaction. La raréfaction s'avance à la suite de la condensation à une distance égale à la moitié de ce que nous appelons *longueur d'onde*. Deux condensations sont séparées par une distance d'une longueur d'onde entière.

Voici, sur cette lame ([1]), des points lumineux représentant des particules d'air condensé, très voisines les unes des autres; un peu plus haut, des particules d'air raréfié. Je tourne lentement la manivelle de l'appareil placé dans la lanterne, et vous voyez les secteurs lumineux qui représentent la condensation se déplacer lentement vers le haut sur l'écran; voici maintenant une autre condensation, limitant, avec la première, une longueur d'onde.

Ce dessin, ou ce tableau, représente une onde sonore simple dont la longueur est égale à 4 pieds ($1^{m},36$). Le mécanisme qui projette sur l'écran ces taches lumineuses représente une onde sonore de 4 pieds de long, se propageant de gauche à droite; c'est l'ut le plus grave de la voix de ténor ([2]). L'air, autour de la bouche d'un chanteur, est alternativement condensé et raréfié, comme vous le voyez ici. Mais cette suite de condensations et de raréfactions s'avance à la vitesse de 1000 pieds (340^{m}) par seconde à peu près; la période exacte du mouvement, dans le cas actuel, correspond à 256 vibrations par seconde.

Suivez une des particules d'air faisant partie d'une onde sonore, et représentées par ces taches lumineuses qui se déplacent sur l'écran; elle se meut maintenant vers la droite, et cette autre particule qui la suit marche plus vite qu'elle; elle atteint à présent sa plus grande vitesse vers la droite, et gagne sur la suivante, qui a atteint plus tôt qu'elle sa vitesse maxima. Nous voyons ainsi que le maximum de condensation se produit dans chaque petite tranche d'air, quand elle se meut avec la vitesse la plus grande *en avant*, ou dans la direction de propagation de l'onde. Vous voyez maintenant que le maximum de raréfaction a lieu quand cette première portion se meut vers la gauche avec la plus grande vitesse. Quand la tranche reste un moment au repos, comme vous le voyez maintenant, elle a sa densité moyenne, mais elle redevient bientôt plus dense parce que sa voisine de gauche a déjà

([1]) Il s'agit d'un schéma de mouvement ondulatoire du son, qui était déplacé devant la lanterne de projection au moyen d'une coulisse.

([2]) *Voir* la note, p. 182.



cessé de se mouvoir vers la gauche et commencé d'aller vers la droite. Vous voyez ainsi comment ces condensations et ces raréfactions se propagent d'une manière continue vers la droite, tandis que chaque particule se meut alternativement à droite et à gauche, ne s'éloignant que très peu de chaque côté de sa position moyenne.

Je vais montrer la différence entre ces vibrations et les vibrations lumineuses. Voici un dessin qui, lorsqu'on le déplace, représente les particules; mais il est en ce moment immobile. Vous pouvez imaginer des particules d'une certaine matière, de cette matière dont le mouvement constitue la lumière. C'est elle que nous nommons *éther lumineux*. C'est la seule substance à laquelle nous appliquions la dynamique en toute sécurité. Une chose dont nous sommes certains, c'est la réalité et la matérialité de l'éther lumineux. Cet instrument n'est qu'un moyen de mettre en mouvement un dessin destiné à faire comprendre le mouvement ondulatoire de la lumière. Je vous le montrerai encore sur un dessin immobile, mais cette disposition montre le mode de mouvement.

Suivez maintenant le mouvement de chaque particule. Ceci représente une particule d'éther lumineux, se mouvant avec sa vitesse maxima quand elle est dans la position moyenne.

Vous voyez en ce moment se mouvoir l'une à côté de l'autre des représentations de ces deux modes de vibration [1], la vibration sonore et la vibration lumineuse; vous voyez se propager l'onde due à la condensation et à la raréfaction, et l'onde due à un déplacement transversal. Remarquez la direction de propagation. Elle va ici de gauche à droite par rapport à vous. Regardez ce qui se passe quand le mouvement devient plus rapide. Voici maintenant la direction changée. L'onde se propage de droite à gauche, puis de nouveau de gauche à droite; chaque particule se meut perpendiculairement à la ligne de propagation.

---

[1] L'orateur montrait deux dessins qui se mouvaient simultanément sur l'écran et représentaient, l'un un mouvement ondulatoire lumineux, l'autre une vibration sonore.

Je vous ai montré une représentation de la vibration des ondes sonores, mais je dois vous dire que le mouvement correspondant à la condensation et à la raréfaction a dû être très exagéré dans le dessin représentatif afin qu'il devînt visible, tandis que la plus grande condensation dans le mouvement sonore réel ne dépasse pas 1 ou 2 pour 100, ou un petit nombre de centièmes. Sauf l'exagération de la grandeur de la condensation, le dessin relatif au son vous donnait une représentation exacte de ce qui a réellement lieu dans la production de la note grave ut.

D'autre part, qu'a-t-on dû faire pour le dessin mobile qui représente les ondes lumineuses? On a grandement exagéré l'inclinaison de la ligne des particules. Il faut imaginer d'abord une file de particules en ligne droite, et imaginer ensuite que cette ligne est déformée de manière à devenir une courbe d'onde, la forme de la courbe correspondant à la perturbation produite. Vous avez vu ce que c'est que la propagation de l'onde; regardez maintenant ce dessin-ci, et regardez ensuite celui-là. Celui-ci représente ce qui correspond, dans les phénomènes lumineux, aux différents sons dont j'ai parlé d'abord. La longueur d'onde de la lumière est la distance d'une crête à la suivante, ou d'un creux au suivant. J'ai parlé de crêtes et de creux, parce que le dessin, dans la position qu'il occupe, nous montre des hauts et des bas dans la courbe.

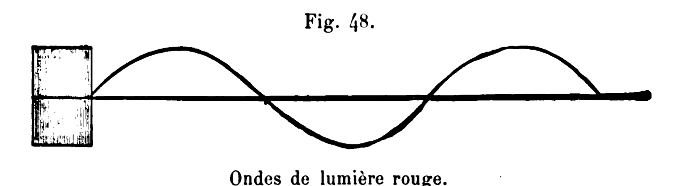
Voici donc une longueur d'onde ([1]). Dans ce dessin placé au-dessous (*fig.* 48) vous voyez la longueur d'onde de la lumière violette. Elle n'est que la moitié de celle de la lumière rouge représentée au-dessus; la période de vibration de la première n'est que la moitié de celle de la seconde. Vous avez là, à une échelle énorme, non seulement exagérée quant à la déclivité de la courbe, mais encore extrêmement amplifiée quant à la longueur d'onde, une représentation des ondes de la lumière violette. Le dessin portant le mot *rouge* (*fig.* 49) correspond à la lumière rouge, et ce dessin placé au-dessous, à la

([1]) L'orateur montrait un grand dessin, ou un tableau, représentant une onde de lumière rouge et une onde de lumière violette (tableau reproduit dans les *fig.* 48 et 49).



lumière violette. La courbe supérieure correspond réellement à une radiation un peu plus basse que les rayons rouges du spectre, et la courbe inférieure à une radiation un peu plus élevée que les rayons violets. La longueur d'onde varie, entre les rayons extrêmes, de 4,5 pour le rouge à 8

Fig. 48.

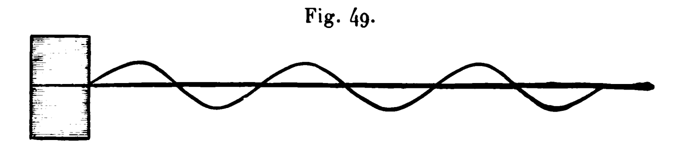


Ondes de lumière rouge.

pour le violet, au lieu de 4 et 8; les ondes rouges sont aux ondes violettes à peu près comme 1 est à 2.

Pour établir une comparaison entre les nombres de vibrations des ondes sonores et le nombre des vibrations qui donnent naissance aux ondes lumineuses, je peux dire que 30 vibrations par seconde est à peu près le nombre le plus faible qui produise un son musical; 50 vibrations par seconde

Fig. 49.



Ondes de lumière violette.

donnent une des notes graves des pédales de l'orgue, 100 ou 200 par seconde donnent les notes graves des voix de basse, les notes plus élevées correspondent à 250 par seconde, 300 par seconde, 1000, 4000 jusqu'à 8000 par seconde; c'est à peu près le son le plus aigu que puisse percevoir l'oreille humaine.

Au lieu des nombres qui correspondent à la portion la plus ordinairement employée de l'échelle musicale, c'est-à-dire des nombres compris entre 200 ou 300 et 600 ou 700 par

seconde, on compte des millions de millions de vibrations par seconde dans les ondes lumineuses : c'est-à-dire qu'au lieu de 400 vibrations par seconde on en a 400 millions de millions, nombre qui correspond à la production de la lumière rouge.

Des rayons de lumière rouge partis de l'étoile la plus éloignée et cheminant dans l'espace sont dus à la propagation par ondes de certaines vibrations, chaque particule du milieu qui les transmet vibrant, de part et d'autre de sa position moyenne, 400 millions de millions de fois dans une seconde.

Certaines personnes prétendent ne pas pouvoir se représenter un million de millions. Celles-là ne peuvent pas comprendre que 2 et 2 font 4. Voici comment j'explique la chose à ceux qui me parlent de l'incompréhensibilité d'aussi grands nombres. Je dis que dans l'Univers la *limitation* est incompréhensible, l'infini *est* compréhensible. Appliquons maintenant à ceci un peu de logique. La négation de l'infini est-elle incompréhensible? Que penseriez-vous d'un univers dont vous rencontreriez les bornes après avoir parcouru un kilomètre, ou dix, ou mille, ou même la distance qui vous sépare de la Californie? Pouvez-vous supposer une fin à la matière ou une limite à l'espace? Cette idée est incompréhensible. Même en supposant que vous marchiez pendant des millions de millions de kilomètres, l'idée que vous pussiez arriver à une extrémité de l'univers est incompréhensible. Vous pouvez comprendre mille fois par seconde aussi facilement que vous comprenez une fois par seconde. Vous pouvez aller de un à dix, puis à dix fois dix et ensuite à mille sans épuiser votre faculté de comprendre, et vous pouvez ensuite arriver à mille millions et à un million de millions. Vous pouvez tous comprendre cela.

Eh bien, 400 millions de millions de vibrations par seconde, voilà l'espèce de phénomène qui constitue un facteur de l'illumination par la lumière rouge. Après ce que vous avez vu, après ce que vous a montré cette courbe (*fig.* 49), je n'ai pas besoin de vous dire que la lumière violette correspond environ à 800 millions de millions de vibrations par seconde. On peut caractériser des espèces de lumière qui correspondent à des fréquences bien plus grandes, et à des fréquences bien

moindres. Vous pouvez imaginer des vibrations dont la fréquence soit à peu près le double de celle de la lumière violette et d'autres dont la fréquence soit à peu près $\frac{1}{15}$ de celle de la lumière rouge, et vous n'aurez pas encore dépassé les limites d'étendue de ces phénomènes continus, dont une partie seulement constitue la lumière *visible*.

Que trouve-t-on quand on s'abaisse au-dessous de la lumière visible rouge? On trouve quelque chose que l'œil ne voit pas, quelque chose que le photographe ne peut faire apparaître sur ses plaques sensibles. C'est de la lumière, mais nous ne la voyons pas. C'est quelque chose qui est si intimement lié à la lumière *visible*, que nous pouvons le définir du nom de lumière *invisible* C'est ce qu'on appelle ordinairement *chaleur rayonnante; chaleur rayonnante obscure*. Peut-être, dans cette épineuse route de la Logique, ayant sans cesse en face de nous des mots difficiles à comprendre, trouverons-nous que la manière la moins embarrassante d'en parler est de l'appeler *chaleur rayonnante*. La sensation de chaleur que vous éprouvez quand vous vous approchez d'un brillant feu de charbon ou d'une chaudière à vapeur, ou quand vous allez à côté, mais non au-dessus, des tuyaux pleins d'eau chaude qu'on emploie pour chauffer une maison, ce que vous ressentez sur votre visage et sur vos mains quand vous vous approchez d'une marmite d'eau bouillante en maintenant les mains à son niveau, tout cela est de la chaleur rayonnante; la chaleur que donnent à vos mains et à votre visage un bon feu ou une bouilloire chaude quand vous les tenez *au-dessous* d'elle, c'est encore de la chaleur rayonnante.

Vous pouvez très bien faire l'expérience avec une théière en terre; elle rayonne la chaleur mieux que l'argent poli. Tenez vos mains au-dessous de la théière, et vous éprouverez une sensation de chaleur; au-dessus d'elle, vous aurez une sensation plus forte; de toute manière vous ressentirez de la chaleur. Si vous tenez la main au-dessus de la théière, vous vous apercevrez aisément qu'il se produit un léger courant ascendant d'air chaud; si vous placez la main au-dessous de la théière, vous sentez monter de l'air froid, et la face supérieure de votre main est chauffée par le rayonnement, tandis

que la face inférieure est ventilée et réellement rafraîchie, grâce à la bouilloire chaude qui se trouve au-dessus d'elle.

Ce que l'on perçoit ainsi par l'intermédiaire du sens de la chaleur est quelque chose qui présente avec la lumière une continuité réelle. Nous connaissons des rayons calorifiques dont la longueur d'onde atteint (en nombre rond) quatre fois celle de la lumière visible ou de la lumière rouge, ou dont la période est le quart de celle de cette lumière. Adoptons pour la lumière rouge 400 millions de millions de vibrations par seconde; la fréquence de la radiation calorifique la plus basse qu'on ait encore rencontrée répond à 100 millions de millions de vibrations par seconde.

J'avais espéré pouvoir vous donner un nombre inférieur. Le professeur Langley a fait, avec son *bolomètre*, de magnifiques expériences sur le sommet du mont Whitney, à une altitude de 4500^{m} au-dessus du niveau de la mer; il a réellement mesuré les longueurs d'onde de radiations calorifiques excessivement basses. Je vous lirai un des nombres qu'il a donnés; je ne l'ai pas appris par cœur, parce que j'attends encore davantage d'un tel observateur [1]. J'ai appris, il y a un an et demi, que la chaleur rayonnante la plus basse qui ait été observée par la méthode de diffraction du professeur Langley correspond à une longueur d'onde de $\frac{28}{100000}$ de centimètre, c'est-à-dire près de quatre fois la longueur d'onde de la lumière rouge, qui est $\frac{7,3}{100000}$ de centimètre. Ainsi le professeur Langley a fait des expériences sur des radiations dont la longueur d'onde a quatre fois la grandeur de celle de la lumière rouge, ou dont la fréquence est le quart de celle de la même lumière, et les a caractérisées comme chaleur rayonnante.

---

(1) Postérieurement à ma Conférence, j'ai appris que le professeur Langley a mesuré au moyen d'un prisme de sel gemme la réfrangibilité des rayons calorifiques émis par un *cube de Leslie* (un vase de métal rempli d'eau chaude et rayonnant de la chaleur par une paroi noircie), et qu'il en a conclu leur longueur d'onde. La plus grande longueur d'onde qu'il ait rencontrée jusqu'ici a $\frac{1}{1000}$ de millimètre, c'est-à-dire vaut 17 fois celle de la lumière de sodium, ce qui correspond à 30 millions de millions de vibrations par seconde à peu près. — Novembre 1884 (W. T.).



Tout le monde connaît la *lumière des photographes,* et a ouï parler d'une lumière *invisible* produisant des effets visibles sur la plaque sensible dans la chambre noire. Je peux dire, en nombre rond, que si l'on double la fréquence que je vous ai signalée pour la lumière violette, on atteint à peu près la limite extrême de l'étendue des lumières ayant les vibrations les plus rapides que l'on connaisse, je veux dire que l'on atteint la plus grande fréquence qui ait été observée jusqu'ici. La lumière photographique, ou actinique, au point où en sont aujourd'hui nos connaissances, nous conduit jusqu'à une longueur d'onde un peu moindre que la moitié de celle de la lumière violette.

Vous voyez donc que, tandis que notre connaissance du mouvement ondulatoire au-dessous du rouge s'étend jusqu'à des vibrations quatre fois moins rapides que la plus lente de toutes celles qui impressionnent l'œil, nous ne connaissons rien, à l'autre extrémité de l'échelle, au delà des vibrations dont la fréquence est double de celle de la lumière violette. En nombre rond, nous avons quatre octaves de lumière, qui correspondent à quatre octaves de son en musique. En musique, l'intervalle d'octave sépare deux notes dont les fréquences sont entre elles comme 1 et 2. Pour ce qui est de la lumière, nous connaissons une octave de lumière visible, une octave au-dessus de celle-ci, et deux au-dessous. La chaleur rayonnante s'étend de 100 à 200, et de 200 à 400 par seconde (il s'agit de millions de millions de vibrations); la lumière visible va jusqu'à 800, la lumière invisible ou actinique à 1600.

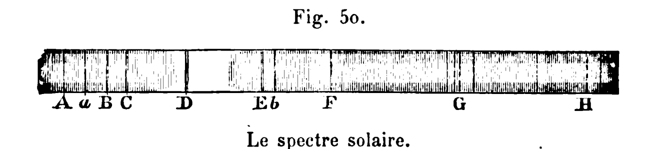
Un effet commun à toutes les radiations est leur effet calorifique. Il est extrêmement faible dans la lumière de la Lune, si faible que jusqu'à ces derniers temps personne ne savait qu'il y eût de la chaleur dans les rayons de la Lune. Herschel ayant remarqué que la Lune fait disparaître les nuages très légers [1], et que cet effet paraît plus sensible à la pleine

[1] On peut douter que le nuage s'évapore quand il passe entre l'œil de l'observateur et la Lune, et penser que s'il devient invisible, c'est que l'œil ébloui par l'éclat de la Lune n'est plus sensible au faible contraste du nuage sur le fond du ciel. (M. B.).

lune que dans les autres phases, pensait que la chaleur lunaire se fait sentir dans notre atmosphère. Cependant Herschel indique ce résultat comme douteux; mais aujourd'hui, au lieu que la question soit douteuse, le professeur Langley affirme que la lumière de la Lune déplace nettement sur son échelle l'indicateur de son instrument si sensible, montrant ainsi l'existence d'un effet calorifique relativement prodigieux.

S'il en est parmi vous qui désirent faire des expériences sur la chaleur du clair de lune, je dois les prévenir qu'il faut mesurer la chaleur au moyen d'appareils qui soient soumis à la seule influence des rayons de la Lune. C'est une précaution très nécessaire; si, par exemple, vous enleviez votre bolomètre

Fig. 50.



Le spectre solaire.

ou tout autre appareil thermoscopique d'une chambre relativement chaude pour l'exposer à l'air de la nuit, vous constateriez une chute de température due à ce déplacement. Quand vous serez sûr que votre appareil est en équilibre de température avec l'air ambiant, prenez votre verre ardent, et dirigez-le vers la Lune, puis vers la région du ciel qui entoure la Lune; vous obtiendrez ainsi une mesure différentielle qui vous permettra de comparer le rayonnement de la Lune au rayonnement du ciel. Vous verrez que la Lune produit un effet calorique très net.

Pour continuer notre étude de la lumière visible, c'est-à-dire des ondulations qui s'étendent du rouge au violet dans le spectre (que je vais vous montrer tout à l'heure), je voudrais d'abord vous dire que les rayons compris dans la partie de ce tableau qui s'étend de la lettre **A** à la lettre **D** ont seulement des effets lumineux et des effets thermiques, mais qu'ils n'ont pas ordinairement d'effet chimique ou photographique. Les photographes peuvent laisser leurs plaques sen-

sibles ordinaires exposées à la lumière jaune et à la lumière rouge sans qu'elles subissent d'effet sensible; mais, quand on s'avance vers l'extrémité bleue du spectre, l'effet photographique commence à se produire avec d'autant plus d'énergie qu'on approche davantage de l'extrémité violette. Si l'on dépasse le violet, on arrive à la lumière invisible, que l'on connaît surtout grâce à son action chimique. Entre le jaune et le violet on constate les trois effets lumineux, calorifique et chimique; au delà du violet, les effets chimique et calorifique seuls; encore l'effet calorifique est-il si faible qu'il est à peine sensible.

Le spectre obtenu au moyen du prisme a révélé à Newton la composition de la lumière blanche. La lumière blanche est constituée par tous les rayons colorés, du rouge au violet. Voici le spectre prismatique de Newton, produit par un prisme. Je vais donner quelques explications sur la nature des couleurs, en plaçant sur le trajet de la lumière de la gélatine colorée, qui ressemble à du verre coloré. Je vais prendre une plaque de gélatine rouge préparée avec soin au moyen de produits chimiques convenables, et étudier son action. De toute la umière qu'elle reçoit entre le violet et le rouge, elle ne laisse passer que le rouge et l'orangé, et donne une couleur rougeâtre complexe. Voici une plaque de gélatine verte; le vert absorbe tous les rayons rouges, et ne laisse passer que les verts. Voici une plaque qui absorbe un peu de lumière dans toutes les régions du spectre, supprime une grande quantité de violet, et donne à la lumière une teinte jaune ou orangée. En voici une autre qui absorbe le vert et tout le violet, laissant passer le rouge, l'orangé et très peu de vert pâle.

Quand on prépare le spectre avec beaucoup de soin, avec beaucoup plus de soin que ne savait le faire Newton, le spectre est pur. Il faut remarquer que Newton n'a pas connu ce que nous appelons un *spectre pur;* il ne l'a pas obtenu, et n'indique pas, dans ses écrits, les conditions qui permettent de l'obtenir. Nous pouvons l'obtenir avec une ligne lumineuse excessivement fine, comme avec un faisceau de lumière solaire, et il ressemble alors à cette peinture placée là au-dessus, rouge, orangé, jaune, vert, bleu, indigo, violet, suivant la nomen-

clature de Newton. Newton, n'ayant jamais employé de faisceaux lumineux étroits, ne pouvait pas obtenir de spectre pur.

Voici une peinture sur verre représentant les couleurs que nous connaissons. J'aurais besoin de deux ou trois heures pour vous expliquer ce soir ce qu'est l'analyse spectrale. Il faut nous arracher à cette étude. Je vous lirai seulement les longueurs d'onde correspondant aux différentes positions qu'occupent dans le spectre du Soleil certaines raies communément appelées *raies de Fraunhofer*. Je prendrai pour unité le cent-millième de centimètre. A l'extrémité rouge du spectre, la lumière voisine de cette raie noire A a pour longueur d'onde 7,6; B a 6,87; D a 5,89; la *fréquence* pour A est 3,9 fois 100 millions de millions, la fréquence de la lumière D est 5,1 fois 100 millions de millions par seconde.

Et maintenant, quelle est la force en jeu dans ces vibrations, comparée à celle qui est relative au son de 400 vibrations par seconde? Supposez pour un moment que la même matière [1] oscillât dans le même espace, mais 400 millions de millions de fois par seconde. La force nécessaire est proportionnelle au carré de la fréquence. Une fréquence double exigerait une force quadruple, pour un même corps vibrant. Supposez que je fasse de nouveau vibrer ma main, comme je l'ai déjà fait. Si je la déplace une fois par seconde, j'ai besoin d'une force modérée; pour 10 vibrations par seconde, il faut 100 fois plus de force; pour 400 vibrations par seconde, 160000 fois plus de force. Si j'agite ma main une fois par seconde dans un espace de $\frac{1}{2}$ centimètre, je ne déploie qu'une très petite force; il en faudrait une très grande pour l'agiter 10 fois par seconde, même dans un aussi petit espace; mais songez à la force nécessaire pour faire vibrer un diapason 400 fois par seconde, et comparez-la avec la force exigée pour un mouvement qui se reproduit 400 millions de millions de fois par seconde. A égalité de masse vibrante et d'amplitude de vibration, la force serait un million de millions de millions de millions de fois aussi grande que la force nécessaire pour mouvoir les branches du diapason; ce nombre est aussi facile à comprendre

(1) Celle du corps sonore, par exemple.



que n'importe quel autre, 2, 3 ou 4 par exemple. Examinons maintenant la signification de ce nombre, et voyons ce que nous pourrons en conclure. Quelles forces y a-t-il dans l'espace compris entre mon œil et cette lumière? Quelles forces y a-t-il dans l'espace compris entre nos yeux et le Soleil, entre nos yeux et l'étoile visible la plus éloignée? Il y a de la matière et il y a du mouvement, mais quelle peut être la grandeur de la force qui s'y exerce?

Je me déplace à travers cet *éther lumineux* comme s'il n'existait pas. Mais si des vibrations du même degré de fréquence prenaient naissance dans un milieu tel que l'acier ou le laiton, les forces correspondantes se mesureraient par des millions, et des millions, et des millions de tonnes par centimètre carré de matière. Il n'y a pas, dans notre air, de forces pareilles. Les comètes produisent une perturbation dans l'air, et peut-être l'éther lumineux est-il déchiré par le mouvement d'une comète qui le traverse. Ainsi quand nous expliquons la nature de l'électricité, nous l'expliquons par un mouvement de l'éther lumineux. Nous ne pouvons pas dire que cet éther soit de l'électricité. Que peut être cet éther lumineux? C'est une matière au travers de laquelle les planètes se meuvent avec la plus grande facilité. Il pénètre notre atmosphère; dans notre air, il est presque dans les mêmes conditions que dans les espaces interplanétaires, autant que nous pouvons en juger. L'air ne modifie que très peu ses propriétés; on peut, au moyen de machines pneumatiques, amener l'air à n'avoir plus que $\frac{1}{1000000}$ de sa densité normale; l'effet de cette raréfaction sur la transmission de la lumière est faible. L'éther lumineux est un corps élastique, que je ne saurais mieux comparer qu'à cette gelée placée sous vos yeux ([1]); ce que vous pouvez imaginer de plus analogue aux ondes lumineuses est le mouvement de cette gelée élastique, avec une balle de bois flottant au milieu d'elle. Voyez ce qui se produit, quand je fais vibrer verticalement, avec ma main, cette petite balle rouge, ou quand je la fais tourner rapidement autour de son dia-

---

([1]) L'orateur montrait une grande jatte de gelée, à la surface de laquelle se trouvait prise, près du centre, une petite balle rouge en bois.



mètre vertical, alternativement dans les deux sens; c'est là la meilleure représentation que je puisse vous donner des vibrations de l'éther lumineux.

On peut encore se le représenter au moyen de la cire des cordonniers écossais, ou de la poix de Bourgogne, mais je connais mieux la cire des cordonniers écossais. Sa densité est très peu supérieure à celle de l'eau, et elle répond parfaitement au but que je me propose. Je prends une large plaque de cire, que je mets dans un vase plein d'eau; je place un certain nombre de bouchons contre la face inférieure de la plaque, et des balles de fusil sur la face supérieure. Cette cire est aussi cassante que la poix de la Trinité ou la poix de Bourgogne que je tiens dans ma main (vous pouvez juger de sa dureté); mais quand on l'abandonne à elle-même, elle coule comme un liquide. La cire des cordonniers se rompt avec une cassure à arêtes vives, mais elle est visqueuse et cède graduellement sous la pression.

Ce que nous savons de l'éther lumineux, c'est qu'il a la rigidité d'un solide et qu'il cède graduellement. S'il est ou n'est pas cassant, et s'il se crevasse, nous ne pouvons le dire; mais, à mon sens, les découvertes en électricité et les mouvements des comètes, ainsi que les merveilleuses traînées de lumière qui en jaillissent, tendent à faire croire à l'existence de crevasses dans l'éther lumineux, montrent qu'il y a corrélation entre l'éclair électrique et l'aurore boréale, et la production de crevasses dans l'éther lumineux. Ne prenez pas ceci pour une affirmation, ce n'est guère plus qu'un vague rêve scientifique; mais vous pouvez considérer l'existence de l'éther lumineux comme une vérité scientifique; c'est-à-dire qu'il y a un milieu répandu partout, un solide élastique doué d'une grande rigidité, une rigidité si prodigieuse relativement à sa densité, que les vibrations de la lumière y atteignent les fréquences que j'ai signalées, avec les longueurs d'onde que j'ai indiquées. La question fondamentale relative à la gravité de l'éther n'est pas encore résolue. Nous n'avons pas connaissance d'une attraction analogue à la gravitation et exercée sur l'éther par des masses semblables à la Terre ou au Soleil, pas plus que d'attractions mutuelles entre différentes parties

de l'éther lui-même. On dit quelquefois qu'il est impondérable, parce que nous pouvons croire ou considérer comme probable qu'il n'est pas pesant.

Voici deux tourmalines; si on les place entre l'œil et la lumière, on aperçoit au travers de la lumière blanche : elles sont transparentes. Si je tourne l'une de ces tourmalines, la lumière est éteinte, il y a obscurité complète, comme si les tourmalines étaient opaques. Cette expérience vous montre ce qu'on appelle la *polarisation de la lumière*. Je ne peux pas vous parler de la nature de la lumière sans vous parler de la polarisation. Il faut que je vous montre un très bel effet dû à la lumière polarisée, avant de vous donner des explications un peu plus complètes au moyen de la vaste représentation mécanique des phénomènes que nous offre ce bassin de gelée. Vous avez vu d'abord deux plaques du cristal tourmaline (venant, je crois, du Brésil), qui possèdent la propriété de laisser passer la lumière quand elles sont orientées toutes deux dans une direction particulière relativement à leurs axes de cristallisation, et d'éteindre les rayons qui les traversent quand on change l'orientation de l'une d'elles. Je place maintenant dans la lanterne un appareil appelé *prisme de Nicol*, qui donne aussi des rayons de lumière polarisée. Un prisme de Nicol est un morceau de spath d'Islande coupé en deux, dont les deux parties, orientées l'une par rapport à l'autre d'une manière très ingénieuse, ont été rapprochées de nouveau et réunies par du baume de Canada. Le prisme de Nicol utilise la propriété du spath d'être doublement réfringent, et produit le phénomène que je vous montre en ce moment. Je fais tourner le prisme sur lui-même pour l'amener dans une certaine position, et vous voyez de la lumière, un maximum de lumière. Je le fais maintenant tourner d'un angle droit, et la lumière disparaît. Je le tourne encore d'un angle droit, le maximum de lumière se reproduit; une autre rotation de 90° ramène l'obscurité; je tourne encore d'un angle droit, vous voyez une vive lumière. On voit rarement un prisme de Nicol aussi grand que celui-ci.

Il y a une autre manière d'obtenir de la lumière polarisée. Je me place devant cette lumière, et je regarde à travers un

des prismes de Nicol, que je fais tourner de cette manière, les rayons qui se sont réfléchis sur une plaque de verre placée sur la table. J'incline maintenant la plaque de verre d'un angle déterminé, un peu plus de 55°, et je trouve une position particulière telle, qu'en regardant dans la direction des rayons réfléchis et tournant ensuite le nicol dans ma main, j'observe une extinction complète de la lumière pour une des positions du nicol, tandis qu'il y a maximum d'éclat pour une autre position. J'emploie un peu témérairement le mot *complète*. La lumière n'est que très affaiblie, et non complètement éteinte, comme cela avait lieu dans le cas où l'on employait conjointement deux prismes de Nicol. Pour ce qui est de la théorie mécanique du phénomène, ceux d'entre vous qui n'en ont encore jamais entendu parler ne pourraient pas me comprendre; je ne pourrais la leur exposer que dans une série de conférences sur l'Optique physique. Le phénomène consiste en ceci : les vibrations lumineuses doivent se faire dans une direction déterminée relativement à la ligne que suit la lumière.

Regardez ce dessin; la lumière va de gauche à droite; les vibrations sont perpendiculaires à la ligne de propagation. Il y a une ligne verticale qui est la ligne de vibration. Imaginez qu'il y ait là une source de lumière, de lumière violette; ici, en face d'elle, est la ligne de propagation. Dans les vibrations sonores l'oscillation se fait dans la direction de la ligne de propagation, et dans celles-ci elle se fait transversalement à cette ligne. Voici une autre vibration perpendiculaire au dessin, et suivant encore la loi de la vibration transversale; voici une autre vibration, circulaire. Imaginez une longue corde; si vous faites tourner une de ses extrémités vous voyez se propager tout du long un mouvement hélicoïdal, et vous pouvez donner naissance à ce mouvement circulaire dans un sens ou dans le sens opposé.

La lumière polarisée rectilignement est de la lumière dont les vibrations se font toutes dans un même plan perpendiculaire au plan mené par le rayon et appelé par les physiciens *plan de polarisation*. La lumière polarisée circulairement consiste en des ondulations de l'éther lumineux, dont les

particules sont animées d'un mouvement circulaire. La lumière polarisée elliptiquement est quelque chose d'intermédiaire; le parcours de la particule vibrante n'est ni une droite ni une circonférence, mais une ellipse. La lumière polarisée est de la lumière dont les vibrations se font continuellement de la même manière. Si elles sont rectilignes, la lumière est polarisée rectilignement; si elles sont circulaires, la lumière est polarisée circulairement; si elles sont elliptiques, la lumière est polarisée elliptiquement.

Grâce à la double réfraction que présente le spath d'Islande, un rayon de lumière naturelle qui y pénètre se divise en deux rayons de lumière polarisée, et dans les deux rayons émergents les vibrations sont rectangulaires. La lumière est toujours polarisée quand elle a été réfléchie par une lame de verre non argenté, ou par l'eau, sous un certain angle qui est de 56° pour le verre, de 52° pour l'eau, et compté toujours à partir de la normale à la surface. L'angle relatif à l'eau est celui dont la tangente est 1,4. Je désire que vous regardiez la polarisation de vos propres yeux. La lumière réfléchie par le verre sous un angle de 56°, et par l'eau sous un angle de 52°, poursuit son chemin en vibrant perpendiculairement au plan d'incidence qui est aussi le plan de réflexion.

Vous pouvez constater la polarisation sans l'aide d'aucun instrument. Il y a en Optique physique un phénomène bien connu, celui des *houppes de Haidinger*. Le savant qui l'a découvert est bien connu à Philadelphie comme minéralogiste, et l'on a donné son nom au phénomène dont je parle. Regardez le ciel dans une direction perpendiculaire à celle du Soleil; vous verrez une croix bleue et jaune, dont les branches jaunes, dirigées l'une vers le Soleil et l'autre à l'opposé du Soleil, se déploient comme des queues de renard; le bleu occupe le centre de la croix, et à angle droit avec le bleu vous verrez deux houppes rouges. Si vous ne les voyez pas, c'est que vos yeux ne sont pas assez sensibles, mais un peu d'exercice vous donnera la sensibilité nécessaire. Si vous ne pouvez les voir de cette manière, essayez d'un autre moyen. Regardez dans un seau d'eau à fond noir, ou bien prenez un vase plat en verre transparent, remplissez-le d'eau, posez-le

sur un drap noir, et regardez de haut en bas la surface de l'eau par un ciel couvert de nuages blancs (si on peut jamais voir pareille chose à Philadelphie). Vous verrez le ciel blanc se réfléchir sur l'eau sous un angle de 52° à peu près. Regardez en inclinant la tête d'un côté, puis de l'autre, en laissant vos yeux fixés sur l'eau, et vous verrez les houppes de Haidinger. Mais n'allez pas trop vite, sous peine de vous donner le vertige. Ce phénomène s'explique par la régénération de la sensibilité de la rétine. La houppe de Haidinger est toujours là, mais vous ne la voyez pas parce que votre œil n'est pas assez sensible. Quand vous l'aurez vue une fois, vous la verrez toujours; elle ne s'impose pas incommodément à votre vue lorsque vous n'avez pas besoin de la voir. Vous pourrez aussi la voir promptement dans un morceau de verre posé sur un drap noir, ou dans un vase plein d'eau.

Je vais terminer en vous disant comment on peut connaître les longueurs d'onde de la lumière et la fréquence des vibrations, et nous effectuerons réellement une mesure de la longueur d'onde de la lumière jaune. Je vais vous montrer le spectre de diffraction.

Vous voyez sur l'écran ([1]), de chaque côté d'une bande centrale blanche, une série de bandes lumineuses diversement colorées; la première bande de chaque série présente une coloration bleue ou indigo à 10 centimètres environ de la bande centrale blanche, et une coloration rouge à 10 centimètres plus loin, avec une vive coloration verte entre le bleu et le rouge. Ces bandes sont produites par un réseau de 400 traits au centimètre, gravé sur verre, que je tiens dans ma main. Le réseau que nous allons essayer ensuite a 111 traits au millimètre. Vous voyez l'espace central, et de chaque côté un grand nombre de spectres, ayant le bleu à une extrémité et le rouge à l'autre. Le fait que dans le premier spectre le rouge est à peu près deux fois plus loin du centre que le bleu prouve que la longueur d'onde de la lumière rouge est double de celle de la lumière bleue.

([1]) L'orateur montrait les bandes colorées projetées sur l'écran par un réseau de diffraction.



Je vais maintenant vous montrer comment on mesure la longueur d'onde de la lumière du sodium, c'est-à-dire d'une lumière semblable à celle qui est marquée D dans le spectre (*fig.* 50), et qui est produite par une lampe à alcool salé. La vapeur de sodium est portée à plus de 1000°, quand elle devient lumineuse et donne cette lumière que l'on voit en jetant du sel sur une lampe à alcool dans le jeu de *Snap-dragon* (1).

Je tiens dans ma main un beau réseau tracé sur du verre recouvert, au moyen du procédé de Liebig, d'une couche d'argent métallique; ce réseau, de 260 traits au millimètre, appartient à mon ami le professeur Barker, qui me l'a prêté ce soir à votre intention. Voyez l'éclat des couleurs, quand je dirige vers vous la lumière réfléchie par le réseau, et que je déplace le faisceau dans la salle. Maintenant, vous avez vu directement, de vos propres yeux, ces brillantes couleurs réfléchies par le réseau, et vous les avez vues aussi projetées sur l'écran, lorsque le réseau était placé dans la lanterne. Maintenant, avec un réseau de 670 traits au millimètre, réseau beaucoup plus fin que le précédent, vous verrez combien le premier spectre s'éloigne de la bande lumineuse centrale, et combien ce réseau augmente la déviation, ou diffraction, du faisceau lumineux. Voici le centre du réseau, et voici le premier spectre. Vous remarquerez que la lumière violette est la moins déviée, et la lumière rouge la plus déviée. C'est précisément cette diffraction de la lumière qui a fourni la première preuve de l'exactitude de la théorie ondulatoire de la lumière.

Vous vous demandez pourquoi la lumière ne contourne pas les angles, comme le son. La lumière contourne les angles dans ces spectres de diffraction; et ils montrent bien qu'elle les contourne, puisqu'elle passe à travers les traits et est déviée d'un angle de 30°. Ce phénomène de contournement d'un angle par la lumière, observable au moyen d'instruments disposés de manière à en montrer le résultat et à calculer les angles dont les rayons ont été déviés, porte le nom de *diffraction de la lumière*.

---

(1) Jeu qui consiste à prendre des raisins dans de l'eau-de-vie enflammée, et à les mettre dans la bouche. (P. L.)

Je peux vous montrer un appareil qui sert à mesurer les longueurs d'onde de la lumière. Laissez-moi vous le décrire sans démontrer la formule. Une lampe à alcool dont la mèche est saupoudrée de sel donne une lumière sensiblement homogène, c'est-à-dire une lumière d'une seule longueur d'onde, ou dont tous les rayons ont la même période. Voici un petit réseau que je tiens dans ma main. Je regarde à travers le réseau cette bougie qui est placée devant moi. Tout à fait près d'elle, et derrière, vous voyez une règle de bois noircie sur laquelle on a tracé deux traits blancs éloignés l'un de l'autre de 25 centimètres. La ligne qui les joint est orientée perpendiculairement à celle suivant laquelle je vais m'éloigner de la règle. Quand je regarde cette lampe à alcool salé je vois une série de spectres de la lumière jaune. Comme je suis un peu myope, je m'aide de ce lorgnon; les lentilles naturelles des yeux d'une personne qui aurait la vue longue lui permettraient de voir sans lorgnon. Vous avez vu sur cet écran une succession de spectres. Maintenant je regarde directement la bougie; que vois-je? Je vois, de chaque côté de la bougie, une suite de 5 ou 6 spectres brillamment colorés. Mais si je regarde la lampe à alcool salé, je vois dix spectres d'un côté et dix de l'autre, chacun d'eux étant constitué par une bande de lumière monochromatique.

Je vais mesurer de la manière suivante la longueur d'onde de la lumière. Je me place à une grande distance de la règle, et je regarde la lampe à alcool salé et les marques. Je vois une série de spectres. La première ligne blanche est exactement derrière la flamme. Je veux mettre le premier spectre à droite de cette ligne blanche, exactement en coïncidence avec la seconde, dont la distance à la première est 25 centimètres. Je m'éloigne, et je vois qu'elle est maintenant très près du spectre; elle coïncide en ce moment avec lui. Il faut mesurer à présent la distance de mon œil au centre de la flamme et réduire les mètres en centimètres. Cette distance est de $10^{m},50$ ou 1050 centimètres. Nous avons alors la proportion suivante: 1050 est à 25 comme la distance de deux traits successifs du réseau est à la longueur d'onde de la lumière du sodium. Le rapport est celui de 42 à 1. La distance entre deux traits est $\frac{1}{400}$

de centimètre; donc la 42e partie de $\frac{1}{400}$ de centimètre, ou $\frac{1}{16800}$ de centimètre, est la longueur d'onde cherchée, d'après cette expérience simple, facile et rapide. La longueur d'onde vraie pour la lumière du sodium est environ $\frac{1}{17000}$ de centimètre, d'après les mesures les plus exactes; notre résultat diffère de celui-là d'un peu plus de 1 pour 100 seulement!

Vous le voyez, mon seul appareil est ce petit réseau, c'est-à-dire un morceau de verre sur lequel on a tracé 400 lignes fines dans un espace de 1 centimètre. Ceux d'entre vous qui voudront prendre la peine d'en acheter un pourront mesurer eux-mêmes la longueur d'onde de la flamme de la bougie. J'espère que quelques-uns d'entre vous auront envie de faire personnellement l'expérience.

Si je mets du sel dans la flamme de la lampe à alcool, que vois-je à travers ce réseau? Je vois seulement une ligne lumineuse jaune finement délimitée, constituant le spectre de la vapeur de sodium, tandis qu'avec la flamme de la bougie je vois un spectre délicieusement coloré, beaucoup plus beau que celui que je vous ai montré sur l'écran. Je vois, à la vérité, de chaque côté de la flamme, une série de spectres dont le bleu est du côté de la flamme et le rouge du côté opposé. Je ne peux pas, dans le spectre de la flamme de la bougie, isoler pour la mesurer une radiation déterminée, comme je puis le faire avec la flamme de la lampe à alcool salé, qui donne, comme je l'ai dit, une lumière jaune simple. La lumière bleue la plus élevée que je voie dans la flamme de la bougie est maintenant exactement sur la ligne blanche. Mon œil en est à $13^{m},30$ ou 1330 centimètres. La 25e partie de ce nombre est 53,2. La longueur d'onde de ce rayon est donc le quotient par 53,2 de $\frac{1}{400}$ de centimètre, ce qui donne $\frac{1}{21280}$, ou $\frac{1}{21000}$ de centimètre. Mesurez maintenant la longueur d'onde pour la lumière rouge la plus basse, et vous trouverez quelque chose comme $\frac{1}{11000}$ de centimètre.

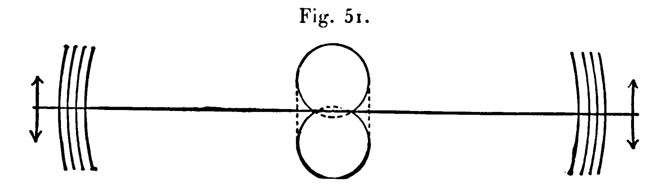
Enfin, comment connaissons-nous la fréquence des vibrations?

C'est au moyen de la vitesse de la lumière. Comment connaissons-nous cette vitesse? Nous avons, pour la mesurer, différents procédés que je ne peux pas vous expliquer parce

que le temps m'en empêche; je peux seulement vous dire brièvement que la fréquence des vibrations pour un rayon déterminé quelconque est égale au quotient de la vitesse de la lumière par la longueur d'onde de ce rayon. La vitesse de la lumière est très exactement de 300000^{km}, ou 30000 millions de centimètres par seconde. Admettons maintenant que la longueur d'onde de la lumière du sodium soit de $\frac{1}{17000}$ de centimètre, comme nous l'avons mesuré au moyen de la lampe à alcool salé; nous trouvons que la fréquence de la vibration de la lumière du sodium est 510 millions de millions par seconde. Vous pouvez donc calculer la fréquence au moyen d'une observation simple que vous pouvez tous faire vous-mêmes.

Il faut enfin que je vous parle de la couleur bleue du ciel, dont l'explication peut être donnée au moyen de cette sphérule prise dans un solide élastique (*fig.* 51). Je vais vous expliquer

Fig. 51.



Sphérule vibrante prise dans un solide élastique.

en deux minutes le mode de vibrations dont il s'agit. Considérez la lumière rectiligne la plus simple. Voici une sphérule qui produit dans un solide élastique un phénomène semblable. Imaginez que ce solide s'étende à des kilomètres horizontalement et verticalement, en dessus et en dessous, et imaginez que cette sphérule vibre verticalement. Il est tout à fait évident que les particules du solide, considérées dans une direction horizontale quelconque, exécuteront des vibrations transversales identiques. Le plan de polarisation est défini comme perpendiculaire à la ligne de vibration. Ainsi, la lumière produite par une molécule vibrant de haut en bas, comme cette boule rouge dans la gelée placée sous vos yeux, est polarisée

dans un plan horizontal parce que les vibrations sont verticales ([1]).

Voici un autre mode de vibration. Que je fasse tourner cette boule en cercle au sein de la gelée, comme je le fais maintenant, et elle va déterminer des vibrations, qui se propageront encore de la même manière dans toutes les directions horizontales. Quand je fais tourner cette boule en cercle, elle entraîne la gelée dans son mouvement; la secousse est rapidement revenue à son point de départ, et la gelée fait ressort. Grâce à l'inertie de la gelée, les vibrations s'étendent dans toutes les directions, et les lignes de vibrations sont horizontales tout au travers de la gelée. Partout, à des kilomètres de distance, ce solide est mis en vibration. Vous ne voyez pas les vibrations, mais vous pouvez concevoir leur existence. Si le solide fait ressort, il exécute des vibrations, et il se produit des ondes de vibrations horizontales se propageant dans toutes les directions à partir de la molécule excitatrice ([2]).

Je fais maintenant osciller la boule rouge horizontalement. Ce mouvement va engendrer des vibrations qui seront parallèles à la direction du mouvement en tous les points du plan perpendiculaire à l'excursion de la molécule excitatrice. Pourquoi le ciel est-il bleu? Ce sont justement des mouvements de cette nature qui donnent naissance à la lumière bleue du ciel, lumière due à des sphérules répandues dans l'éther lumineux, à peine modifié par l'air. Figurez-vous le soleil près de l'horizon, figurez-vous la lumière ruisselant dans l'atmosphère et colorée, au-dessus de vos têtes, en bleu d'azur et en violet. Songez d'abord à une particule quelconque, et imaginez qu'elle se meuve de manière à déterminer des vibrations horizontales et verticales, circulaires et elliptiques.

Vous voyez la couleur bleue du ciel dans la vapeur à haute pression qui s'échappe dans l'air; vous la voyez dans l'expérience du ciel bleu de Tyndall, dans laquelle une faible con-

---

([1]) Formules 2 de la note, page 132.
([2]) Formules 3 de la note, page 132.

densation de vapeur donne naissance exactement au bleu d'azur du ciel.

Le mouvement de l'éther lumineux relativement à la sphérule produit exactement l'effet que produirait un mouvement contraire imprimé à la sphérule d'une manière tout à fait indépendante, par une force indépendante. Vous pouvez donc penser que la couleur bleue du ciel est due à des vibrations exécutées dans l'air par une matière qui vibre à peu près comme vibre ce petit globe emprisonné dans la gelée.

Voici d'une manière générale ce que l'on peut dire : la lumière qui vient du ciel bleu est polarisée dans un plan contenant le soleil, mais un grand nombre de causes rendent complexe la lumière bleue du ciel; parmi elles, on peut signaler ce fait que l'air est illuminé non seulement par le soleil, mais encore par la terre. S'il était possible de couvrir la terre d'un drap noir, nous pourrions étudier la lumière polarisée du ciel dans des conditions de simplicité irréalisables actuellement. Il se produit, dans la nature, des réflexions d'une complication infinie sur les mers, les rochers, les collines et les rivières.

Que les observateurs observent le ciel bleu non seulement en hiver quand la terre est couverte de neige, mais aussi en été, quand elle est couverte d'un feuillage vert sombre : cela les aidera à débrouiller les phénomènes compliqués dont il est question. Mais la lumière bleu d'azur du ciel est produite par la réaction sur l'éther vibrant de petites sphérules d'eau, ayant $\frac{1}{50000}$ ou $\frac{1}{100000}$ de centimètre de diamètre peut-être, ou peut-être de petites particules, ou de petits fragments de matière de forme non définie, ou de cristaux de sel marin, ou de grains de poussière, ou de germes végétaux ou animaux flottant dans l'air. Et maintenant, qu'est-ce que l'éther lumineux? C'est une matière prodigieusement moins dense que l'air, des millions et des millions de fois moins dense que l'air. Nous pouvons nous faire quelque idée des limites entre lesquelles sont comprises ses propriétés. Nous croyons que c'est une substance réelle dont la rigidité est grande en comparaison de sa densité; il peut exécuter 400 millions de millions de vibrations dans une seconde; et cependant sa densité est

si faible qu'il n'exerce pas la moindre résistance au mouvement d'un corps qui le traverse.

Revenons à la cire des cordonniers, qui nous a servi à nous représenter les phénomènes : si dans le cours d'une année un bouchon traverse de bas en haut une plaque de cire placée sous l'eau, et si une balle de plomb la traverse en sens inverse, quelle est la loi de la résistance? Elle dépend évidemment du temps. Le bouchon, dans l'espace d'une année, creuse lentement son chemin à travers une épaisseur de 5 centimètres; accordez-lui un ou deux milliers d'années pour faire le même chemin, la résistance sera énormément moins grande; ainsi le mouvement d'un bouchon ou d'une balle de plomb à travers la cire, avec une vitesse de 2 centimètres en 2000 ans, peut être comparé à celui de la terre, qui se meut à la vitesse de 6 fois 149 millions de kilomètres par an, ou 30^{km} par seconde, à travers l'éther lumineux; mais, quand nous pourrons réaliser une substance élastique comme la gelée et cédant à la pression comme la poix, notre foi dans l'hypothèse spéculative d'un éther lumineux élastique, hypothèse qui constitue la théorie ondulatoire de la lumière, recevra sûrement une base large et solide.

IX.

SUR L'AGE DE LA CHALEUR SOLAIRE.

RÉIMPRIMÉ, AVEC AUTORISATION, D'APRÈS *Macmillan's Magazine* MARS 1862.

La seconde grande loi de la Thermodynamique implique un principe d'*action irréversible dans la nature.* Il résulte de là que, bien que l'énergie mécanique soit *indestructible,* il y a une tendance universelle à la dissipation de cette énergie, tendance qui détermine une augmentation et une diffusion progressives de la chaleur, un arrêt graduel du mouvement, et l'épuisement progressif de l'énergie potentielle existant dans l'univers matériel (¹). Le résultat serait nécessairement un état de repos et de mort, si l'univers était fini et continuait d'obéir aux lois existantes. Mais il est impossible de concevoir une limite à l'étendue de la matière dans l'univers; la Science, par conséquent, conduit plutôt à admettre un développement sans fin, dans un espace sans bornes, d'une action qui entraîne la transformation de l'énergie potentielle en mouvement sensible et par suite en chaleur, qu'à considérer l'univers comme un mécanisme fini, fonctionnant à la manière d'un mouvement d'horlogerie et s'arrêtant pour toujours. Il est également impossible de concevoir soit le commencement soit la continuation de la vie, sans l'intervention d'un pouvoir créateur souverain; et, par conséquent, aucune des conclusions

(¹) Voir *On a Universal Tendency in Nature to the Dissipation of Mechanical Energy* (*Proceedings of the Royal Society of Edinburgh,* 19 avril 1852; ou *Philosophical Magazine,* octobre 1852; et aussi *Mathematical and Physical Papers,* t. I, art. LIX).

de la Science dynamique, au sujet de la condition future de la terre, ne peut être considérée comme donnant des idées décourageantes relativement à la destinée de la race d'êtres intelligents qui l'habitent actuellement.

L'objet du présent article est l'application de ces principes à la recherche des périodes de temps pendant lesquelles le Soleil peut être regardé comme ayant probablement été ou devant probablement être encore une source de chaleur et de lumière.

La discussion du sujet sera divisée en trois parties :

I. *Le refroidissement séculaire du Soleil.*
II. *La température actuelle du Soleil.*
III. *L'origine et la quantité totale de la chaleur solaire.*

PREMIÈRE PARTIE.

SUR LE REFROIDISSEMENT SÉCULAIRE DU SOLEIL.

Y a-t-il exactement compensation entre la chaleur développée dans le Soleil et la chaleur qu'il rayonne? — Taux probable du refroidissement annuel; loi de contraction et chaleur spécifique de la masse solaire.

En admettant que le Soleil se refroidisse, quel est aujourd'hui le taux annuel de ce refroidissement? Nous n'avons aucun moyen de l'indiquer avec certitude; tout au plus, pouvons-nous l'estimer de la manière la plus grossière. En premier lieu nous ignorons complètement s'il perd de la chaleur, car il est tout à fait certain que *de la chaleur est développée* dans l'atmosphère du Soleil par un influx de matière météorique; et il est possible que la quantité de chaleur ainsi engendrée d'une année à l'autre soit suffisante pour compenser la perte par rayonnement. Cependant il est encore possible que le Soleil soit actuellement une masse liquide incandescente, rayonnant de la chaleur, soit que cette chaleur ait été créée

à l'origine au sein de sa substance, soit, ce qui paraît bien plus probable, qu'elle ait été engendrée par la chute de météores dans les âges passés, sans qu'aucune compensation sensible s'établisse par la continuation de l'action météorique.

On a montré que, si la première hypothèse était exacte (¹), les météores qui, dans les 2000 ou 3000 dernières années, auraient engendré la chaleur solaire, auraient dû être pendant tout ce temps à une distance du Soleil bien moindre que celle de la terre, et par conséquent auraient dû s'approcher graduellement du corps central en décrivant des spirales très lentes; si, en effet, une quantité de matière suffisante pour produire l'effet thermique supposé était tombée sur le Soleil en partant de points extérieurs à l'orbite terrestre, la longueur de l'année aurait été très sensiblement raccourcie depuis lors grâce à l'augmentation de la masse du Soleil qui s'en serait suivie. La quantité de matière qui dans cette hypothèse aurait dû tomber annuellement atteint $\frac{1}{47}$ de la masse de la terre, ou $\frac{1}{15000000}$ de celle du Soleil : il serait donc nécessaire de supposer que la *lumière zodiacale* a une masse au moins égale à $\frac{1}{5000}$ de celle du Soleil, pour rendre compte de la même manière d'une provision de chaleur solaire devant fournir à la dépense de 3000 années à venir. Quand ces conclusions furent publiées pour la première fois, on indiqua l'étude des *perturbations dans les mouvements des planètes visibles* comme devant nous fournir le moyen d'estimer la quantité de matière pouvant exister dans la lumière zodiacale; et l'on conjectura qu'il ne devait pas y en avoir assez pour fournir encore de la chaleur pendant 30000 années, au taux actuel de la déperdition. Ces prévisions ont été confirmées jusqu'à un certain point par les grandes recherches de Le Verrier sur le mouvement de la planète Mercure; la perturbation sensible mise récemment en évidence par ces recherches peut être attribuée à une matière, comparable à un grand nombre de petites planètes, et circulant autour du Soleil dans l'inté-

---

(¹) *On the Mechanical Energies of the solar system* (*Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, avril 1864; *Philosophical Magazine*, décembre 1854; *Mathematical and Physical Papers*, t. II, art. LXVI).



rieur de son orbite. Mais cette matière est en quantité très faible; et par conséquent, si l'influx météorique qui se produit actuellement est suffisant pour donner naissance à une portion appréciable de la chaleur rayonnée, il faut supposer qu'il provient d'une matière circulant autour du Soleil, à une très faible distance de la surface. La densité de ce nuage météorique aurait dû être supposée si grande, que les comètes auraient à peine pu s'en dégager; elles l'ont fait cependant, puisqu'elles n'ont pas paru éprouver de résistance appréciable, après avoir passé à une distance de la surface du Soleil égale à $\frac{1}{8}$ de son rayon. Tout bien considéré, il semble peu probable que la radiation solaire soit aujourd'hui compensée d'une manière appréciable par la chaleur engendrée par la chute de météores; et, comme on peut montrer qu'il n'y a pas de théorie chimique soutenable ([1]), on doit admettre, comme la conclusion la plus probable, que le Soleil est simplement une masse liquide incandescente qui se refroidit.

La connaissance de la quantité dont il se refroidit d'une année à l'autre devient donc une question du plus sérieux intérêt, mais à laquelle nous sommes complètement incapables de répondre pour le moment. Nous avons, il est vrai, des données qui pourraient servir de base plausible à une évaluation probable, et desquelles nous pourrions déduire, avec une confiance qui paraît légitime à première vue, des limites pas très écartées, entre lesquelles doit être compris le taux actuel du refroidissement du Soleil. Nous savons, en effet, d'après les recherches indépendantes mais concordantes de Herschel et de Pouillet, que le soleil rayonne chaque année par toute sa surface environ $2,7 \times 10^{30}$ fois (2,7 millions de millions de millions de millions de millions de fois) la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1° la température d'une masse de 1^{kg} d'eau. Nous avons aussi d'excellentes raisons de croire que la substance du Soleil est très semblable à celle de la terre. Les principes de Chimie solaire et stellaire de Stokes ont été exposés pendant bien des années à l'Université de Glasgow, et l'on a enseigné comme premier résultat,

---

([1]) *Mechanical Energies of the solar system. Voir* Note page 227.

que le sodium doit certainement exister dans l'atmosphère du Soleil, et dans les atmosphères d'un grand nombre d'étoiles, mais qu'on n'en peut découvrir trace dans d'autres. La récente application de ces principes dans les splendides recherches de Bunsen et Kirchhof (dont les découvertes sont indépendantes de la théorie de Stokes) a montré avec une égale certitude qu'il y a dans le Soleil du fer et du manganèse, ainsi que plusieurs autres des métaux que nous connaissons. La chaleur spécifique de chacune de ces substances est inférieure à celle de l'eau, qui à la vérité dépasse celle de tous les autres corps terrestres connus, solides ou liquides. Il paraît donc probable, à première vue, que la chaleur spécifique moyenne de la substance totale du Soleil (¹) est moindre que celle de l'eau, et très certain qu'elle ne peut pas être beaucoup plus grande. Si elle était égale à la chaleur spécifique de l'eau, nous n'aurions qu'à diviser le nombre précédent ($2,7 \times 10^{30}$) déduit des observations de Herschel et de Pouillet, par le nombre de kilogrammes ($1,9 \times 10^{30}$) correspondant à la masse du Soleil, pour trouver $1°,4$, comme taux actuel de refroidissement annuel. Il paraît donc probable que le Soleil se refroidit annuellement de plus de $1°,4$, et presque certain que l'abaissement de sa température n'est pas inférieur à ce nombre. Mais si cette évaluation était bien fondée, il serait également juste de supposer que la dilatation du Soleil (²)

(¹) La chaleur spécifique d'un corps homogène est la quantité de chaleur qu'une unité de masse doit gagner ou perdre pour que sa température s'élève ou s'abaisse de 1°. La chaleur spécifique moyenne d'une masse de substance homogène soumise à des pressions différentes en différents points est le quotient de la quantité de chaleur que prend ou abandonne le corps entier quand sa température s'élève ou s'abaisse de 1°, par le nombre d'unités de masse contenues dans la masse du corps. L'expression *chaleur spécifique moyenne* du Soleil désigne, dans le texte, le quotient par la masse du Soleil de la quantité de chaleur qu'il rayonne effectivement pendant le temps que met sa température moyenne à s'abaisser de 1°, quels que soient d'ailleurs les changements physiques ou chimiques que puisse éprouver une portion quelconque de sa substance.

(²) La *dilatation en volume* ou *dilatation cubique* d'un corps est l'expression employée en Physique pour désigner le taux de l'accroissement ou de la diminution du volume correspondant à une élévation ou à une chute de température de 1°, en supposant que la masse tout entière ait la même température. L'ex-



sous l'influence de la chaleur ne diffère pas beaucoup de la dilatation moyenne des corps terrestres. Si, par exemple, elle était égale à celle du verre solide, qui est environ $\frac{1}{40000}$ en volume ou $\frac{1}{120000}$ en diamètre par degré centigrade (et pour la plupart des liquides terrestres, surtout aux températures élevées, elle est beaucoup plus grande), et si la chaleur spécifique était égale à celle de l'eau, le diamètre du Soleil se contracterait de 1 pour 100 en 860 ans; cette contraction aurait à peine pu échapper aux observations astronomiques. Il y a cependant une raison bien plus puissante que celle-ci de croire qu'il ne peut pas s'être produit une telle contraction, et, par suite, de soupçonner que les conditions physiques de la masse du Soleil rendent les substances dont il est composé très différentes, au point de vue de l'expansibilité et de la chaleur spécifique, de ce qu'elles sont dans nos expériences de laboratoire. La gravitation qui s'exerce entre les différentes parties de la masse du Soleil pendant sa contraction doit développer une quantité de travail qu'on ne peut calculer avec certitude, uniquement parce qu'on ignore la distribution de la densité à l'intérieur du Soleil. La quantité de travail accomplie pour une contraction de $\frac{1}{1000}$ en diamètre serait égale, comme l'a montré Helmholtz, à 20000 fois l'équivalent mécanique de la quantité de chaleur qui représente, d'après Pouillet, le rayonnement solaire annuel, si la densité était uniforme dans tout l'intérieur. Mais en réalité la densité du Soleil doit croître beaucoup quand on s'approche du centre, et probablement dans des proportions variables avec l'abaissement de la température et la contraction de la masse tout entière. Nous ne pouvons donc pas dire si la quantité de travail réellement accomplie par la gravitation pendant la durée d'une contraction de $\frac{1}{1000}$ en diamètre est supérieure ou inférieure à celle qui correspond à 20000 années de chaleur; mais nous pouvons regarder comme très probable qu'elle n'est ni beaucoup plus grande ni beaucoup plus petite que cette quantité.

---

pression *dilatation du Soleil*, employée dans le texte, peut être considérée comme désignant le rapport de la diminution réelle du volume pendant un abaissement de 1° C. de sa température moyenne, au volume actuel.

D'ailleurs il est au plus haut point improbable que l'énergie mécanique puisse jamais augmenter dans un corps qui se contracte en vertu d'un refroidissement. Il est certain qu'elle diminue réellement et d'une quantité très notable, dans tous les cas que l'on a jusqu'à présent soumis à l'expérience. Il faut donc supposer que le Soleil rayonne toujours une quantité de chaleur un peu supérieure à l'équivalent calorifique du travail développé dans la masse qui se contracte par la gravitation mutuelle de ses différentes parties. D'après cela, en se contractant de $\frac{1}{1000}$ en diamètre ou de $\frac{3}{1000}$ en volume, le Soleil doit émettre de la chaleur pour plus de 20000 années ou pour une période pas beaucoup moindre; ainsi, en dehors même de l'évidence historique relative à la constance du diamètre, on peut, semble-t-il, conclure en toute sécurité qu'une contraction aussi forte que celle qu'on a calculée plus haut ($\frac{1}{100}$ en 860 ans) ne peut pas s'être réellement produite. Bien au contraire, étant donné le taux actuel du rayonnement, il paraît probable qu'une contraction de $\frac{1}{1000}$ dans le diamètre du Soleil ne pourrait pas se produire en beaucoup moins de 20000 ans, et il paraît à peine possible qu'elle puisse se produire en moins de 8600 ans. Si donc la chaleur spécifique moyenne de la masse du Soleil, dans ses conditions réelles, n'est pas supérieure à 10 fois celle de l'eau, la dilatation en volume doit être inférieure à $\frac{1}{4000}$ pour 100°C. (c'est-à-dire inférieure à $\frac{1}{10}$ de celle du verre solide), ce qui paraît improbable. Mais bien que cette considération nous conduise à regarder comme possible que la chaleur spécifique du Soleil ait une valeur de beaucoup supérieure à 10 fois celle de l'eau (et, par suite, que sa masse se refroidisse de beaucoup moins de 100° en 700 ans, conclusion que nous pourrions à peine éviter, à la vérité, en nous appuyant simplement sur des considérations géologiques), les principes de Physique sur lesquels nous nous appuyons ne nous donnent aucune raison de supposer que cette chaleur spécifique soit supérieure à 10000 fois celle de l'eau, parce que nous ne pouvons pas dire avec quelque probabilité que sa dilatation en volume soit supérieure à $\frac{1}{400}$ pour 1°C. D'autre part, il y a de très fortes raisons de croire que la chaleur spécifique

est réellement très inférieure à 10000. Car il est tout à fait certain que la température moyenne du Soleil atteint, même aujourd'hui, 14000°C. [1]; et, comme nous le verrons dans la troisième Partie de cet article, la plus grande quantité de chaleur qu'il soit possible d'attribuer avec quelque probabilité à des causes naturelles n'aurait pu à aucun moment porter la masse du soleil à cette température, si sa chaleur spécifique n'était pas inférieure à 10000 fois celle de l'eau.

Nous pouvons donc admettre que la chaleur spécifique du Soleil est très probablement comprise entre 10 fois et 10000 fois celle de l'eau liquide. On déduirait de là, avec certitude, que sa température s'abaisse de 100° dans un intervalle de temps compris entre 700 ans et 700000 ans.

Que devons-nous donc penser des évaluations géologiques qui donnent 300 millions d'années comme la durée de la « dénudation du Weald »? [2] Laquelle de ces deux explications offre le plus de probabilité? Les conditions physiques de la matière solaire différant de celles de la matière soumise à nos expériences 1000 fois plus que la dynamique ne nous oblige à le supposer [3], ou une mer orageuse, avec des marées analogues à celles de la Manche, et d'une extrême violence, rongeant une falaise de craie avec une rapidité 1000 fois plus grande que celle qui correspond à l'évaluation de M. Darwin, c'est-à-dire $2^c,5$ par siècle?

---

(1) D'après les observations de M. Le Châtelier (*C. R.*, 1892), un corps *noir* devrait avoir une température de 7500° environ pour rayonner comme la surface du Soleil. (M. B.)

(2) Le nom de Weald désigne en Géologie des formations crétacées ainsi nommées du pays du Wealden, comté de Sussex. Il n'est question ici, naturellement, que de celles que l'on rencontre dans ce comté lui-même. (P. L.)

(3) Ne pas perdre de vue la définition particulière de la chaleur spécifique moyenne du Soleil, p. 229, Note I. (M. B.)

DEUXIÈME PARTIE.

SUR LA TEMPÉRATURE ACTUELLE DU SOLEIL.

Nous avons beaucoup de raisons de croire qu'à sa surface la température du Soleil ne peut pas être très supérieure à celles que nous pouvons obtenir artificiellement dans nos laboratoires terrestres.

Entre autres raisons, on peut signaler ce fait que la chaleur rayonnée par chaque mètre carré de la surface du Soleil équivaut seulement à 76500 chevaux-vapeur [1] environ. Du charbon brûlant à raison d'un peu moins de 5^{kg} en deux secondes engendrerait la même quantité de chaleur; et l'on a calculé (Rankine, *Prime Movers*, p. 285, éd. de 1852) que dans les fourneaux de locomotives on brûle de 5^{kg} en 30 secondes à 5^{kg} en 90 secondes par mètre carré de surface de grille. Donc, le Soleil rayonne de la chaleur à un taux ne dépassant pas de 15 à 45 fois le taux du dégagement de chaleur qui se produit sur la grille d'un fourneau de locomotive, à égalité de surface.

La température de l'intérieur du Soleil est probablement très supérieure à celle de sa surface, parce que la conduction directe de la chaleur peut ne jouer qu'un rôle insensible dans le transport de chaleur entre les portions internes et externes de la masse, et qu'il doit s'établir dans toute la masse un état à peu près permanent dû au transport de la chaleur par convection, si toute la masse est liquide. Cela revient à dire que les températures, à différentes distances du centre, doivent être approximativement celles qu'une portion quel-

(1) L'expression cheval-vapeur est employée en Mécanique (d'après l'évaluation de Watt) pour désigner une quantité de travail telle qu'il se développe dans une minute une quantité d'énergie correspondant à 4500 kilogrammètres. D'après la valeur que les déterminations de Joule assignent à l'équivalent mécanique de la chaleur, cette quantité de travail, si elle se transformait complètement en chaleur, serait suffisante pour élever de 1° par minute la température de $10^{kg},6$ d'eau.



conque de la substance acquerrait en vertu d'une dilatation sans perte ou gain de chaleur si on la transportait du centre à la surface.

TROISIÈME PARTIE.

SUR L'ORIGINE ET LA QUANTITÉ TOTALE DE LA CHALEUR SOLAIRE.

Le Soleil étant, pour les raisons ci-dessus indiquées, considéré comme un liquide incandescent qui perd de la chaleur, une question se pose naturellement : Quelle est l'origine de cette chaleur? Il est certain qu'elle ne peut pas avoir existé dans le Soleil depuis un temps infini, parce que, tant qu'elle a existé, cette chaleur doit s'être constamment dissipée, et que, le Soleil étant fini, l'hypothèse de l'accumulation dans ce corps d'une provision de chaleur indéfinie ne saurait être admise.

Le Soleil doit donc être une source active de chaleur créée par un décret souverain à une époque dont l'antiquité n'échappe pas à toute mesure; ou bien la chaleur qu'il a toujours rayonnée, et celle qu'il possède encore, doivent avoir été acquises par un mécanisme naturel, suivant des lois établies et permanentes. Sans affirmer que la première hypothèse soit tout à fait incroyable, nous pourrons dire en toute sécurité qu'elle est fort improbable, si nous réussissons à montrer que la seconde n'est pas contradictoire avec les lois physiques connues. Nous montrerons cela, et autre chose encore, simplement en considérant des actions qui s'accomplissent actuellement sous nos yeux et qui, si elles ont été assez considérables à une époque passée, ont dû donner au Soleil assez de chaleur pour expliquer tout ce que nous savons de son rayonnement passé et de sa température actuelle.

Il n'est pas nécessaire de donner ici tout au long les détails relatifs à la théorie météorique, qui semble avoir été proposée pour la première fois sous une forme précise par Mayer, puis,

d'une manière indépendante, par Waterston; ni ceux qui concernent l'hypothèse modifiée des tourbillons météoriques, qui, comme l'a montré l'auteur du présent article, est nécessaire pour expliquer comment la longueur de l'année, telle qu'on la connaît depuis 2000 ans, a pu n'être pas sensiblement altérée par l'accroissement qu'a dû subir la masse du Soleil pendant cette période, si la chaleur rayonnée a été toujours compensée par de la chaleur engendrée par des chutes de météores.

Pour les raisons énumérées dans la première Partie de cet article, nous pouvons admettre aujourd'hui qu'il faut rejeter toutes les théories de compensation météorique complète, ou presque complète à l'époque actuelle; mais nous pouvons encore soutenir ceci :

Non seulement il est prouvé que l'action météorique... est... une des causes de la chaleur solaire, mais c'est la seule de toutes les causes imaginables dont l'évidence se manifeste à nous d'elle-même (¹).

La forme de la théorie météorique qui semble actuellement la plus plausible, et qui a été discutée pour la première fois d'après les vrais principes de la Thermodynamique par Helmholtz (²), consiste à supposer que le Soleil et sa chaleur ont été engendrés par une conjonction de corps plus petits, tombant les uns sur les autres en vertu de leurs attractions mutuelles, et développant, comme l'exige la grande loi démontrée par Joule, une quantité de chaleur exactement équivalente au mouvement perdu dans le choc.

Que l'une des formes de la théorie météorique donne certainement l'explication vraie et complète de la chaleur solaire, c'est ce dont il est à peine possible de douter, quand on considère les raisons suivantes :

1° On ne peut concevoir aucune autre explication naturelle, à moins d'envisager une action chimique;

(¹) *Mechanical Energies of the solar system. Voir* Note, p. 227.

(²) Conférence publique faite le 7 février 1854 à Königsberg, à l'occasion de la commémoration de Kant.



2° La théorie chimique est tout à fait insuffisante, parce que l'action chimique la plus énergique que nous connaissions, s'effectuant entre des substances qui, prises en bloc, auraient une masse égale à celle du Soleil, n'engendrerait de chaleur que pour 3000 ans environ (¹);

3° Avec la théorie météorique, il n'y a aucune difficulté à rendre compte de 20 millions d'années de chaleur.

Il faudrait donner trop de longueur à cet article et recourir à quelques calculs mathématiques pour expliquer complètement les principes sur lesquels est fondée cette dernière évaluation. Il suffira de dire que si des corps, tous beaucoup plus petits que le Soleil, placés primitivement dans un état de repos relatif et à des distances grandes en comparaison de leurs diamètres, venaient à tomber les uns sur les autres et à former par leur réunion un globe de densité uniforme, ayant même masse et même diamètre que le Soleil, il se développerait une quantité de chaleur qui, calculée d'après les principes et les résultats expérimentaux de Joule, est juste égale à 20000000 de fois la valeur trouvée par Pouillet pour le taux annuel du rayonnement solaire. La densité du Soleil doit, selon toute probabilité, croître quand on s'approche du centre; on doit donc supposer qu'une quantité de chaleur beaucoup plus considérable encore a été dégagée, si toute sa masse a été formée par l'agglomération de corps relativement petits. D'autre part, nous ignorons la quantité de chaleur qui peut avoir été dissipée par la résistance et par des chocs plus faibles, avant l'agglomération finale; mais il y a lieu de croire que même l'agglomération la plus rapide que nous puissions imaginer avec quelques chances d'exactitude n'aurait pu laisser au globe complètement constitué que la moitié environ de la quantité totale de chaleur correspondant à la quantité d'énergie potentielle de gravitation qui aurait disparu. Nous pouvons donc accepter, comme une limite inférieure de la chaleur initiale du Soleil, 10 millions de fois la quantité rayonnée actuellement dans un an; mais nous pouvons admettre comme possible une quantité 50 millions ou 100 mil-

(¹) *Mechanical Energies of the solar system. Voir* Note, p. 227.

lions de fois plus grande, en raison de la densité plus grande du Soleil dans sa partie centrale.

Les considérations développées ci-dessus, dans cet article, relativement à la chaleur spécifique possible du Soleil, à la vitesse de son refroidissement, et à la température de sa surface, font regarder comme probable qu'il a dû être, il y a un million d'années, notablement plus chaud qu'il ne l'est aujourd'hui; et par conséquent, s'il a existé comme luminaire pendant dix ou vingt millions d'années, il doit avoir rayonné une quantité de chaleur bien supérieure au produit par ce nombre de la quantité rayonnée aujourd'hui dans un an.

Il semble donc très probable, en définitive, que le Soleil n'a pas illuminé la terre pendant 100 millions d'années, et presque certain qu'il ne l'a pas illuminée pendant 500 millions d'années. Pour l'avenir, nous pouvons dire, avec une égale certitude, que les habitants de la terre ne pourront pas continuer à jouir pendant un grand nombre de millions d'années de la lumière et de la chaleur nécessaires à leur existence, à moins que des sources aujourd'hui ignorées de nous n'aient été placées en réserve dans le grand arsenal de la création.

Impossibilité de la théorie chimique (S.-W. Thomson, 1854, *Mechanical Energies of the solar system*). — Pour suffire à la radiation solaire, un bloc de coton-poudre brûlant par sa surface sans déflagrer, et du volume actuel du Soleil, serait entièrement consumé en 8000 ans. Pour avoir émis la même quantité de chaleur annuelle, par unité de surface, et conservé le même éclat depuis 8000 ans, il faudrait qu'il ait eu alors un diamètre double du diamètre actuel. Un kilogramme de charbon brûlant dans l'oxygène dégage une quantité de chaleur dont l'équivalent mécanique, 340000 kilogrammètres, n'est que $\frac{1}{3000}$ de la force vive qu'il acquerrait en tombant par spirales serrées de l'infini jusqu'à la surface du Soleil.

M. B.



X.

SUR LA CHALEUR SOLAIRE.

CONFÉRENCE DU VENDREDI SOIR, FAITE DEVANT L'INSTITUTION ROYALE DE GRANDE-BRETAGNE, LE 21 JANVIER 1887; VOYEZ AUSSI *Good Words* POUR MARS ET AVRIL 1887.

Nature du Soleil; théorie de Helmholtz. — Équivalent mécanique de la chaleur rayonnée par le Soleil; comment on peut concevoir la production de cette chaleur. — Conservation de la chaleur solaire; combinaison chimique; condensation. — Comment on peut estimer la durée de la chaleur solaire, dans le passé et dans l'avenir. — Idée de la distribution de la densité et de la température, au sein de la masse du Soleil. — Histoire du Soleil; différentes manières de concevoir comment il a pu se former. — État initial de la matière qui le constitue.

L'histoire de l'humanité nous apprend que pendant plusieurs milliers d'années le Soleil a donné à la terre, comme aujourd'hui, de la chaleur et de la lumière; peut-être son éclat a-t-il subi des fluctuations considérables; peut-être a-t-il subi des variations progressives et de quelque importance. Les annales de l'agriculture, ainsi que l'histoire naturelle des plantes et des animaux pendant les temps historiques, montrent jusqu'à l'évidence qu'il n'y a pas eu de très grands changements dans l'intensité de la chaleur et de la lumière solaires pendant les 3000 dernières années; cependant il peut y avoir eu des variations atteignant 5 ou 10 pour 100, comme nous pouvons nous en rendre compte en considérant que l'intensité de la radiation envoyée du Soleil à la terre est de 6,5 pour 100 plus grande en janvier qu'en juillet (1); et jamais personne, ni à l'équateur, ni dans aucun des deux

(1) Parce que la terre est plus près du Soleil en janvier qu'en juillet; on arrive facilement au résultat en appliquant le théorème fondamental de la Photométrie. (P. L.)

hémisphères, n'a pu découvrir cette différence au moyen d'une expérience ou d'une observation de quelque nature qu'elles fussent. Mais si nous laissons de côté la question de l'uniformité du rayonnement, pour ne nous occuper que de l'âge du Soleil, nous trouvons des preuves d'une durée de beaucoup supérieure à 3000 ans dans l'histoire géologique, qui démontre avec la dernière évidence la continuité de la vie sur la terre pendant des dizaines de milliers, et probablement pendant des millions d'années.

Voici donc un splendide sujet de méditations et de recherches pour la Philosophie naturelle, ou la Physique, ou la Science de la matière brute. Le Soleil, simple fragment de matière dont les dimensions ont la valeur modérée que nous connaissons, et complètement entouré d'éther froid [1], a produit pendant 3000 ans du travail au taux de 481000 millions de millions de millions de chevaux-vapeur, et pendant quelques millions d'années à un taux plus élevé peut-être, et certainement pas beaucoup moindre. Comment expliquera-t-on cela? La Philosophie naturelle ne peut pas éluder la question, et aucun des physiciens qui n'essaient pas de la résoudre n'est excusable, à moins que tout son temps ne soit pris par des travaux sur quelque autre sujet ou quelques autres sujets de sa compétence, par l'étude desquels il ait plus d'espoir de faire avancer la Science.

On peut admettre comme un résultat acquis des recherches scientifiques, que le Soleil *n'est pas* un feu ardent; *c'est* simple-

---

(1) Le Soleil chauffe et éclaire la terre grâce à un mouvement ondulatoire déterminé par sa température élevée, et transmis à travers une matière appelée ordinairement *éther lumineux*, qui remplit tout l'espace jusqu'à l'étoile la plus éloignée, et a la propriété de transmettre la chaleur rayonnante (ou la lumière) sans s'échauffer lui-même. Je crois avoir le droit de laisser de côté l'adjectif lumineux, parce que le milieu, s'étendant bien au delà de la surface de la terre, à travers lequel nous recevons la chaleur solaire (ou la lumière), et à travers lequel les planètes se meuvent, était appelé *éther* 2000 ans avant que les chimistes n'eussent usurpé ce nom pour désigner l'*éther sulfurique*, l'*éther chlorhydrique*, et d'autres composés qu'ils avaient l'idée bizarre de supposer particulièrement éthérés; et je crois que les chimistes d'aujourd'hui ne m'en voudront pas si j'emploie le mot éther purement et simplement pour désigner le milieu dont les mouvements ondulatoires constituent la chaleur (ou la lumière).



ment une masse liquide à très haute température et qui se refroidit, en acquérant de petites provisions d'énergie nouvelle grâce à la chute accidentelle de météores, mais en quantité très faible en comparaison de la somme totale d'énergie qu'il perd d'une année à l'autre sous forme de chaleur. La forme donnée par Helmholtz à la théorie météorique de l'origine de la chaleur solaire peut être acceptée comme ayant le plus haut degré de probabilité scientifique qu'il soit possible d'attribuer à une hypothèse relative à des actions qui se sont exercées dans les temps préhistoriques. Le principe fondamental de l'explication est le suivant : à une certaine époque, très lointaine, la chaleur initiale du Soleil a été engendrée par le choc de fragments de matière qui, placés d'abord très loin les uns des autres, se sont rejoints en vertu de leurs attractions mutuelles et ont formé sa masse actuelle ; et la contraction due au refroidissement donne, grâce au travail accompli par la gravitation mutuelle de toutes les parties de la masse qui se contracte, cette vaste capacité d'emmagasinement de la chaleur grâce à laquelle le refroidissement a été et continue à être si lent.

Dans quelques livres, excellents d'ailleurs, on soutient ce « paradoxe » que le Soleil se réchauffe en vertu de sa condensation (¹). Il n'y a pas de place dans la Science pour les paradoxes. Leur suppression, ou la substitution de propositions et d'idées vraies à des propositions et à des idées fausses, n'est pas toujours aussi facile que dans le cas actuel. La vérité,

(¹) [Note du 21 février 1887.] — Le « paradoxe » auquel il est fait allusion ici est simplement, comme je le vois maintenant, une citation inexacte (fautive et manifestement paradoxale grâce à l'omission d'une condition essentielle) d'une conclusion étonnante et très importante d'un Mémoire de J. Homer Lane, publié dans *Americal Journal of Science*, juillet 1872 (il y sera fait allusion plus particulièrement page 256 ci-dessous). Dans la *Popular Astronomy* de Newcomb, 1ʳᵉ édition, p. 508, l'omission est réparée dans une note, qui donne une explication claire et élémentaire de la partie dynamique de la conclusion de Lane ; la question est semblablement traitée dans *Story of the Heavens*, de Ball, p. 501, 502 et 503, de manière à éviter complètement le « paradoxe ». Je saisis cette occasion de corriger ma hâtive correction du « paradoxe », en introduisant les quelques mots en italique ajoutés aux lignes 7 et 8 de ce paragraphe.

(W. T.)



la voici; c'est parce que le Soleil devient moins chaud, *aux points où la densité conserve la même valeur,* que sa masse peut céder graduellement à la tendance de la gravitation à produire la condensation (¹) : c'est ainsi que, d'âge en âge, le

---

(¹) Cette assertion me paraît exacte en toute rigueur, exacte seulement en moyenne, ou même inexacte suivant l'idée qu'on se fait de l'état du Soleil.

1° Supposons que le Soleil est une masse continue actuellement en équilibre hydrostatique, et que cet équilibre est, au point de vue thermique, sensiblement l'équilibre convectif, c'est-à-dire celui que n'altérerait aucunement la circulation, sans perte ni gain de chaleur, d'une partie de la matière dans un tube fermé sur lui-même. Chaque élément de volume supporte la pression et a la température qui correspond à la position qu'il occupe; il possède la densité qui correspond à cette pression et à cette température. La gravitation est équilibrée et ne peut cesser de l'être que par un abaissement de température; c'est l'abaissement de température qui, en augmentant la densité, permet à la gravitation d'effectuer un travail positif. L'assertion en italique est rigoureuse.

2° Mais tel n'est pas tout à fait le Soleil; il tourne sur lui-même, et comme il est fluide il n'est pas douteux que l'équilibre qui peut s'établir dans ces conditions est un équilibre convectif, dans lequel la masse se divise en anneaux contigus plus ou moins nombreux, caractérisés chacun par un moment de rotation déterminé, d'autant moindre que l'anneau est plus rapproché de l'axe commun. La conservation du moment de rotation d'une masse fluide qui circule à l'intérieur d'un même anneau a pour conséquence une distribution de vitesses linéaires *en raison inverse* de la distance à l'axe, dans chaque anneau. Aux confins de deux anneaux distincts, les vitesses linéaires sont très différentes, de violents mouvements tourbillonnaires y prennent naissance (avec rotation projetée sur l'équateur de même sens que la rotation générale); il se forme au milieu de chaque tourbillon un entonnoir creux dépourvu de matière, et sur les bords, le mélange de deux matières, de rotation inverse, amène une conversion énergique et localisée de force vive en chaleur. Ce second mécanisme se rapproche du mécanisme grossier décrit pages 243-244.

L'abaissement de température général du Soleil amène la contraction; la diminution de tous les rayons augmente la différence des vitesses linéaires $\left(\frac{A_1 - A_2}{r}\right)$ des parties contiguës de deux anneaux dont les moments de rotation sont A_1 et A_2, et favorise la production de nouveaux tourbillons sur leurs confins; dans ces régions exceptionnelles, il peut y avoir à la fois élévation de température et diminution de densité, l'assertion de Thomson est encore vraie en moyenne.

3° Enfin l'assertion serait tout à fait fausse si on l'appliquait aux états très anciens pour lesquels on peut supposer que la matière était disséminée dans l'espace, non pas sous forme continue, mais sous forme d'une multitude de morceaux solides ou liquides disjoints, comme l'anneau de Saturne, ou l'essaim des petites planètes. Pour cette sorte de nébuleuse, la gravitation s'exerce librement vers les régions de plus grande concentration, ou à peu près; les divers corps

refroidissement et la condensation se poursuivent de conserve.

Un point essentiel de la théorie de la chaleur solaire d'Helmholtz, est que le soleil doit être liquide; en effet, quand bien même, à un moment donné, la couche superficielle (si épaisse qu'on la suppose d'ailleurs) serait assez chaude pour être incandescente, la conduction de la chaleur de l'intérieur vers l'extérieur à travers une matière solide, même possédant le plus grand pouvoir conducteur qui nous soit connu, ne suffirait pas à maintenir l'incandescence de la surface pendant plus de quelques heures, après quoi tout deviendrait sombre. L'observation confirme cette conclusion en ce qui concerne l'apparence extérieure du Soleil, mais ne suffit pas à réfuter l'opinion si éloquemment soutenue par Sir John Herschel, opinion qui prévalait encore il y a trente ou quarante ans, et d'après laquelle le Soleil serait un noyau solide enveloppé d'une nappe de flammes violemment agitées. En réalité,

---

s'y portent en nombre, s'y entre-choquent, et y convertissent une partie de la force vive due au travail de gravitation en chaleur qui élève la température de chacun de ces corps. Ici ce n'est plus l'abaissement de température qui est l'antécédent, mais bien le travail de la gravitation universelle. C'est bien ainsi que Thomson représente la création de la chaleur solaire (*voir* la fin de la conférence). Mais c'est là de l'histoire très ancienne; les morceaux solides froids se sont fondus, volatilisés depuis longtemps déjà; la température de la surface rayonnante du Soleil s'est rapidement élevée, a atteint un maximum, et est maintenant et depuis de longs siècles en pleine décroissance.

C'est le point de vue de l'équilibre convectif thermique et mécanique d'une masse continue, qui me paraît actuellement exact.

Ce sujet a été traité par Helmholtz dans le Mémoire *Ueber atmosphærische Bewegungen*)*Sitz. Ak. Wisch.*, Berlin, 1888) qui, malgré son titre, se rapporte bien plutôt aux mouvements d'une masse solaire rayonnant uniformément par toute sa surface qu'à l'atmosphère terrestre, dont tout le mouvement est lié à la différence des quantités de chaleur reçues aux pôles et à l'équateur, différence entièrement laissée de côté par Helmholtz. Je ne serais pas étonné que ce Mémoire soit le point de départ de nouvelles recherches cosmogoniques bien plus satisfaisantes que celles dans lesquelles on cherche les conditions d'équilibre d'une masse qu'on suppose à la fois animée d'un mouvement de rotation de vitesse angulaire uniforme dans toute sa masse, et fluide, ce qui est physiquement incompatible, le caractère du fluide étant que les équilibres qui s'y produisent sont convectifs; c'est-à-dire que le déplacement d'une partie de la matière dans un tube fermé, sans échange de chaleur et sans frottement, ne trouble aucunement l'équilibre. (M. B.)

la matière qui forme l'enveloppe extérieure du Soleil, et qui rayonne la chaleur, doit devenir plus dense en se refroidissant; elle ne peut donc rester dans cette position élevée et elle doit tomber, tandis que du liquide plus chaud afflue vers le haut pour la remplacer. L'étude des courants furieux qui se produisent ainsi continuellement dans cette grande masse de fluide enflammé constitue le domaine de la Physique solaire; grâce à son merveilleux instrument de recherches, le spectroscope, cette Science nous fait acquérir chaque année et chaque jour des connaissances de plus en plus étendues sur les mouvements réels des différents éléments et sur les phénomènes si magnifiques et d'une importance si grande qui en résultent.

Pour nous faire une idée de la quantité de chaleur qui est continuellement entraînée à la surface du Soleil et rayonnée dans l'espace, ainsi que des relations dynamiques qui existent entre cette chaleur et la gravitation solaire, divisons ce nombre prodigieux (481×10^{21}) de chevaux-vapeur par le nombre ($6,1 \times 10^{18}$) de mètres carrés contenus dans la surface du soleil; nous trouvons 78800 chevaux-vapeur comme équivalent mécanique du rayonnement par mètre carré. Imaginez donc que les machines de huit cuirassés, réunies au moyen d'un mécanisme idéal composé d'innombrables arbres, poulies et courroies, et produisant tout le travail qu'elles peuvent donner, soit 10000 chevaux-vapeur chacune, soient employées à mouvoir continuellement une petite palette au sein d'un liquide contenu dans un réservoir de 1^{mq} de surface. La surface du liquide rayonnerait la même quantité de chaleur que chaque mètre carré de la surface du Soleil.

Passons maintenant de cette combinaison de machines, pratiquement impossible, et de cette palette, de ce liquide et du vase qui le contient, physiquement impossibles, à une combinaison matérielle plus pratique et produisant le même effet : conservons encore le réservoir idéal, le liquide et la palette, mais plaçons le réservoir à la surface d'un globe froid, solide, homogène, ayant les mêmes dimensions que le Soleil (697000^{km} de rayon) et une densité égale à sa densité moyenne (1,4). Au lieu d'employer la puissance de la vapeur,

supposons la palette mise en mouvement par un poids descendant dans un puits creusé sous le réservoir. Prenons, pour avoir recours au mécanisme le plus simple, un long arbre vertical, à l'extrémité duquel la palette est montée de manière à tourner horizontalement. Supposons que le poids soit un écrou mobile sur un filet de vis placé sur l'arbre vertical, et qu'il soit muni de guides destinées à l'empêcher de tourner, l'écrou et les guides étant absolument sans frottement. Supposons que le puits ait 1^{mq} de surface à sa partie supérieure, qu'il soit creusé jusqu'au centre du Soleil, et que sa section, toujours carrée et régulièrement décroissante, se réduise à un point au centre. Supposons que le poids soit constitué simplement par la matière enlevée en creusant la masse du Soleil, qu'il n'y ait qu'un petit intervalle entre lui et les quatre parois du puits, et qu'on ait enlevé la partie inférieure terminée en pointe sur une longueur de 1^{km} environ, de manière à lui permettre de descendre. La masse de ce poids est 326 millions de tonnes-masse. Son poids, qui est les trois quarts de celui d'une masse égale placée à la surface du Soleil, est de 244 millions de tonnes, en choisissant les unités d'après la valeur de la pesanteur à la surface du Soleil. Un cheval-vapeur correspond à 270 tonnes-mètres terrestres par heure, ou à 10 tonnes-mètres dans le système de mesures relatif à la surface du Soleil, parce qu'une tonne de matière pèse 27 fois plus à la surface du Soleil qu'à la surface de la terre. Pour développer 78800 chevaux-vapeur, ou 788000 tonnes-mètres solaires par heure, notre poids devrait donc descendre avec une vitesse de 1^{m} en 313 heures, ou environ 28^{m} par an (1).

---

(1) *a*. Soit R le rayon du Soleil, ρ sa densité supposée uniforme; la masse de la pyramide dont la base est l'unité, sera $\frac{1}{3}\rho R$; la masse du Soleil est $\frac{4}{3}\pi\rho R^3$, le poids d'une masse égale à celle de la pyramide et placée à la surface du Soleil (c'est-à-dire l'attraction de cette masse par le Soleil) sera

$$P = \frac{4}{9} f \pi \rho^2 R^2,$$

f étant le facteur de l'attraction universelle.

Supposons maintenant la pyramide en place, et considérons la section A faite par une sphère de rayon z; sa surface est $\frac{z^2}{R^2}$; le volume d'une tranche de hau-

Pour nous approcher encore un peu, bien qu'au moyen d'un mécanisme irréalisable, des conditions de production de la chaleur solaire, supposons que l'angle du filet de la vis et de

---

teur dz, et appuyée sur cette section, sera, aux quantités du second ordre près, $\frac{z^2}{R^2}dz$, et sa masse $\rho \frac{z^2}{R^2}dz$; mais la sphère de rayon z exerce, sur chaque unité de masse placée à sa surface, une attraction égale à $\frac{4}{3}f\pi\rho z$; l'attraction exercée

Fig. 52.

sur la tranche A sera donc $\frac{4}{3}f\pi \frac{\rho^2}{R^2} z^3dz$, et l'attraction sur la pyramide tout entière, c'est-à-dire son poids réel, sera

$$P' = \frac{4}{3}f\pi \frac{\rho^2}{R^2}\int_0^R z^3dz = \frac{1}{3}f\pi\rho^2R^2.$$

On a $P' = \frac{3}{4}P$.

La substitution à ρ et à R de leurs valeurs numériques dans l'expression $\frac{1}{3}\rho R$ donne 326×10^6 tonnes-masse; si l'on convient de prendre comme unité de poids le poids de l'unité de masse de matière à la surface du Soleil, ce nombre représentera, en tonnes solaires, le poids de la pyramide placée à la surface du Soleil. Son poids réel est $\frac{3}{4} \times 326 \times 10^6 = 244 \times 10^6$.

b. Le rayon du Soleil étant égal à 112 rayons terrestres, le volume du Soleil est 112^3 ou 14×10^5 fois celui de la terre; la densité du Soleil étant environ $\frac{1}{4}$ de celle de la terre, la masse du Soleil est $\frac{1}{4} \times 14 \times 10^5 = 35 \times 10^4$ fois celle de la terre. Le rapport de la gravité à la surface du Soleil, à la gravité à la surface de la terre sera donc $\frac{35 \times 10^4}{112^2} = 27$.

c. La vitesse de chute de la pyramide est obtenue en divisant 788×10^8, travail développé dans une heure, par 244×10^6, poids dont la chute développe ce travail. (P. L.)

l'axe décroisse uniformément quand on avance vers l'intérieur, de telle façon que la vitesse du poids, quand il descend grâce au mouvement de l'écrou, soit proportionnelle à sa distance au centre du Soleil. Ceci implique une condensation uniforme de la matière qui constitue le poids; mais une condensation tellement faible même pendant des dizaines de milliers d'années, que quelle que soit la matière du poids, métal ou pierre, la résistance opposée à la condensation par son élasticité est complètement négligeable vis-à-vis des forces de gravitation qui sont en jeu. Le travail accompli pour chaque mètre de chute de l'extrémité supérieure du poids sera juste égal au $\frac{4}{5}$ de ce qu'il était quand le pas de vis était uniforme. Ainsi, pour exécuter un travail de 78800 chevaux-vapeur, l'extrémité supérieure du poids doit descendre avec une vitesse de 35 mètres par an, ou 70^{km} en 20000 ans.

Supposons maintenant que la surface tout entière de notre Soleil solide et froid soit divisée en carrés dont chacun ait, par exemple, une surface aussi voisine que possible de 1^{mq}, et supposons que la masse entière soit partagée en longues pyramides renversées, ou en tiges terminées en pointe, ayant chacune une longueur de 697000^{km}, les pointes se réunissant toutes au centre. Que chacune de ces pyramides soit montée sur un écrou, comme cela a déjà été dit pour le long poids effilé considéré tout d'abord; que la palette placée à la partie supérieure de chacun des arbres filetés tourne dans un liquide non plus contenu dans une cuve, mais couvrant la surface entière du soleil et s'étendant sur une épaisseur de quelques mètres ou de quelques kilomètres. Disposez de la viscosité du liquide et de la grandeur de chaque palette de telle façon que cette palette tourne aussi vite qu'il le faut pour permettre à la partie supérieure de chaque tige effilée de descendre avec une vitesse de 35^m par an. Le liquide tout entier sera porté à l'incandescence par le travail dû au mouvement des palettes, et il émettra une quantité de chaleur et de lumière juste égale à celle qui est réellement émise par le Soleil. Si le liquide s'étendait à quelques milliers de mètres de profondeur au-dessous des palettes, il serait impossible de constater, au moyen de l'un quelconque des appareils de la

Physique solaire, la moindre différence entre notre modèle mécanique de Soleil et le Soleil véritable.

Cherchons à supprimer les derniers vestiges de ce mécanisme irréalisable, dans lequel les poids de toutes les parties de chaque longue tige sont supportés par le filet d'une vis idéale creusée sur un arbre vertical de matière idéale, absolument dure et absolument dépourvue de frottement : revenons d'abord d'un pas en arrière; revenons à notre hypothèse d'une seule tige de cette espèce et d'un seul écrou descendant dans un seul puits creusé jusqu'au centre du Soleil, et supposons que tout le reste de la masse du Soleil soit rigide et absolument imperméable à la chaleur. Chauffons la matière de cette tige pyramidale à une température telle que cette matière fonde et reçoive une quantité de *mouvement répulsif* de Sir Humphry Davy suffisante pour que le liquide soit en équilibre, et conserve, sans qu'il puisse s'élever ou s'abaisser, la position où le filet de la vis maintenait la tige. Quand la matière sera ainsi fixée sans le secours de la vis, supprimons celle-ci, ou faisons-la fondre à la place qu'elle occupe.

Nous aurions ainsi un puits allant de la surface du Soleil à son centre, ayant à sa partie supérieure une section de 1^{mq}, rempli d'un liquide incandescent que nous pouvons supposer formé des éléments mêmes de la substance solaire. Ce liquide, ayant au premier instant la température à laquelle l'a porté la palette, continuerait pendant cet instant à rayonner autant de chaleur qu'il en rayonnait quand la palette était en mouvement; mais sa température s'abaisserait rapidement et considérablement à la surface, et jusqu'à une distance de quelques mètres au-dessous. Des courants de liquide refroidi descendant vers l'intérieur et des courants de liquide plus chaud montant de l'intérieur en tourbillons irréguliers entraîneraient le liquide refroidi au-dessous de la surface, et amèneraient à la partie supérieure du liquide plus chaud; mais ce mélange ne pourrait pas se poursuivre sur une grande profondeur avec une activité suffisante pour maintenir à la surface une température approchant de celle qu'y déterminait le mouvement de la palette, et, au bout de quelques heures ou de quelques jours, la surface commencerait à se

solidifier. Si la matière solidifiée flottait au-dessus d'un liquide à la même température, la croûte s'épaissirait simplement comme la glace d'un lac s'épaissit au-dessus de l'eau à 0°; mais si, comme cela est plus probable, la matière solide, formée d'éléments semblables à ceux qui composent le Soleil, s'enfonçait dans le liquide quand tous deux seraient à la température de fusion de la substance, de minces pellicules de la croûte supérieure tomberaient dans l'intérieur, et continueraient à descendre jusqu'à ce que, quelques mètres plus bas, la masse entière de solide et de liquide mêlés devînt assez ferme (d'une fermeté analogue à celle de la pâte ou du mortier) pour empêcher la couche solidifiée d'abandonner la surface. La couche superficielle s'épaissirait alors rapidement, et en quelques heures ou en quelques jours la température de sa partie supérieure s'abaisserait au-dessous du rouge; le puits plein de liquide continuerait à se refroidir avec une extrême lenteur, jusqu'à ce qu'après un million de millions de millions d'années peut-être, ou environ, la température fût devenue partout égale à celle de l'espace vers lequel rayonne sa partie supérieure.

Que la même chose se produise exactement pour chacune de nos tiges pyramidales, ces tiges étant cependant séparées les unes des autres, au début, par de minces cloisons de matière imperméable à la chaleur. Il s'accomplira dans chaque puits exactement la même suite de phénomènes que dans celui que nous avons considéré d'abord.

Supposons que la masse entière, ainsi composée, fasse un tour complet autour d'un axe en 25 jours, ce qui est à peu près, aussi exactement que nous le sachions, la durée de la rotation du soleil autour de son axe.

Supposons maintenant qu'au moment où la palette s'arrête, toutes les cloisons disparaissent, de sorte que les courants puissent circuler avec une complète liberté dans toutes les directions sans qu'il y ait d'autres résistances que celle qui est due à la viscosité du liquide, et abandonnons à elle-même cette masse de matière, que nous pouvons maintenant nommer le Soleil. Elle commencera de suite à manifester tous les phénomènes connus de la Physique solaire. Naturellement, l'ob-

servateur pourrait avoir à attendre quelques années avant d'apercevoir les taches, et quelques quarts de siècle avant de découvrir leur période; mais elles y seraient probablement toutes, je crois pouvoir l'affirmer, et exactement dans les conditions où elles sont; nous pouvons en effet, à mon avis, considérer comme très probable que toutes ces actions sont dues à la substance même du Soleil, et non à une influence extérieure quelconque. Il est cependant très possible, et en réalité un grand nombre de ceux qui sont le plus au courant de la question pensent que cela est probable, que quelques-uns des principaux phénomènes dus à des taches solaires proviennent d'influx de matière météorique circulant autour du Soleil.

L'énergie de combinaison chimique n'est rien si on la compare à l'énergie que développe la condensation due à la gravitation, et qui entretient presque seule l'activité solaire. Quand un corps tombe sur la surface du Soleil d'une hauteur de 46^{km} ou à *travers l'atmosphère du Soleil*, la force de gravitation lui fait accomplir un travail qui, s'il devait être fourni par la combustion de matériaux combustibles, représenterait une quantité très considérable d'énergie chimique. Mais les combinaisons et les dissociations chimiques peuvent très bien, comme le soutient Lockyer dans son Ouvrage récent, *Chemistry of the Sun,* influer sur certaines particularités des variations d'éclat dans ces importants phénomènes des taches, des flammes d'hydrogène, et de la couronne, qui constituent le domaine de la Physique solaire. Mais ces questions se rattachent à une admirable branche de la Science solaire, à laquelle on ne peut faire aujourd'hui que des allusions.

Ce qui nous intéresse, au point de vue de l'explication de la lumière et de la chaleur solaires, peut être résumé en deux propositions :

1° Des courants gigantesques sont continuellement entretenus au travers de la masse liquide du Soleil par la chute du liquide qui s'est légèrement refroidi à la surface, et l'ascension du liquide plus chaud qui vient le remplacer.

2° Le travail accompli pendant une durée quelconque par l'attraction mutuelle de toutes les parties du liquide, quand

il se contracte en vertu de l'abaissement de sa température, n'est que de très peu inférieur (de si peu qu'on peut pratiquement les regarder comme égaux) à l'équivalent mécanique de la chaleur rayonnée par le Soleil dans le même temps.

Le taux de la condensation correspondant à la valeur actuelle du rayonnement solaire répond, comme nous l'a montré la considération de notre modèle dynamique, à une diminution du rayon de 35^m par an, c'est-à-dire de $\frac{1}{10000}$ de sa longueur dans 2000 ans. Si donc la valeur du rayonnement solaire a été à peu près la même qu'aujourd'hui pendant 200000 années, son rayon a dû être, il y a 200000 ans, de 1 pour 100 plus grand qu'aujourd'hui. Si nous voulons pousser nos calculs beaucoup au delà de 200000 années soit dans le passé, soit dans l'avenir, nous devrons, pour tenir compte de la variation de la densité (qui, par exemple, serait de 3 pour 100 pour une variation de 1 pour 100 du rayon), évaluer les variations de l'inverse du rayon, et non simplement celles du rayon lui-même. Voici donc la règle, facile à énoncer d'après les principes mis en lumière par notre modèle mécanique.

Des variations égales de l'inverse du rayon correspondent à des quantités égales de chaleur rayonnée de million d'années en million d'années.

Prenons deux exemples :

1° Si la quantité de chaleur rayonnée par le Soleil aux époques passées est égale à 15 millions de fois celle qui est rayonnée aujourd'hui dans un an, le rayon du Soleil a dû être quatre fois plus grand qu'il n'est actuellement ([1]).

([1]) Le rayon du Soleil, diminuant de $\frac{1}{100}$ de sa valeur en 200000 ans, doit diminuer de $\frac{1}{20}$ en 1 million d'années; il doit donc avoir aujourd'hui un rayon R égal aux $\frac{19}{20}$ du rayon R' qu'il avait il y a 1 million d'années, et l'on a

$$\frac{1}{R} - \frac{1}{R'} = \frac{1}{20}\,\frac{1}{R}.$$

Pour une période 15 fois plus grande, la différence des inverses serait 15 fois plus grande. R_0 désignant la valeur du rayon au commencement de cette période, on aurait

$$\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} = \frac{15}{20}\,\frac{1}{R} = \frac{3}{4}\,\frac{1}{R}, \qquad \text{d'où} \qquad R_0 = 4R. \qquad \text{(P. L.)}$$

2° Si la puissance calorifique du Soleil peut être entretenue par la condensation jusqu'à ce qu'il ait rayonné 20 millions de fois autant de chaleur qu'il en rayonne actuellement dans un an, son rayon deviendra la moitié de ce qu'il est ([1]). Mais, il faut le remarquer, la densité que ce résultat supposerait étant 11,2, ou à peu près la densité du plomb, serait probablement trop grande pour permettre à la condensation de se continuer encore librement comme celle d'un gaz qui se refroidit; elle serait sans doute gênée par l'agglomération des molécules. Il semble donc très probable que nous ne pouvons pas compter, pour l'avenir, sur une quantité de chaleur s'élevant à plus de 20 millions de fois le rayonnement annuel d'aujourd'hui, si même nous pouvons compter sur autant que cela. Il faut aussi remarquer que la surface rayonnante, bien amoindrie et à une température beaucoup plus basse ([2]), émettrait annuellement beaucoup moins de chaleur que n'en émet le Soleil dans les conditions actuelles. Les mêmes considérations ont conduit Newcomb à cette conclusion « qu'il est difficile de croire que le Soleil puisse continuer à fournir assez de chaleur pour entretenir la vie sur la terre (au moins la vie telle que nous la connaissons actuellement) pendant 10 millions d'années encore ».

Jusqu'à présent, pour plus de simplicité, nous avons considéré dans nos calculs la densité comme uniforme et égale à la densité moyenne vraie du Soleil, qui est environ 1,4 ou à peu près le quart de celle de la terre. En réalité, la densité

([1]) En effet, en désignant par R_1 le rayon du Soleil dans 20 millions d'années et par R son rayon actuel, on a

$$\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R} = \frac{20}{20}\frac{1}{R}, \qquad \text{d'où} \qquad R_1 = \frac{R}{2}. \qquad \text{(P. L.)}$$

([2]) D'après la remarque ci-dessus (p. 242) il n'est nullement évident que la perte de chaleur ait pour conséquence un abaissement de la température *superficielle;* tout dépend de la manière dont se localise la conversion du travail en chaleur; si actuellement cette conversion se fait dans toute la masse, et si plus tard le régime des courants internes favorisait au contraire un mode de conversion tout superficiel, il pourrait arriver qu'une perte de chaleur de l'ensemble, soit pourtant accompagnée d'une élévation de température à la surface. (M. B.)



doit être un peu moindre dans les parties supérieures de la masse du Soleil et beaucoup plus considérable dans les parties centrales, car la pression dans l'intérieur croît quand on s'approche du centre, pour devenir énorme au centre lui-même. Si nous connaissions la distribution de la densité à l'intérieur, nous pourrions facilement modifier nos calculs de manière à en tenir compte; mais il paraît probable que la correction ne pourrait ajouter qu'un petit nombre de millions d'années au passé du Soleil, quelque hypothèse que l'on pût raisonnablement faire sur la grandeur de la densité dans une portion considérable de l'intérieur du Soleil; et ce qui pourrait être ajouté au passé doit être retranché à l'avenir.

Dans nos calculs nous avons pris pour l'activité du rayonnement solaire le nombre de Pouillet, qui se confond pratiquement avec celui de Herschel. Forbes [1] a montré la nécessité de modifier la manière dont ses deux prédécesseurs ont tenu compte de l'absorption atmosphérique dans le calcul de la valeur du rayonnement solaire total, et a été ainsi conduit à adopter un nombre dont le rapport avec les leurs est 1,6. Quarante ans plus tard, Langley [2], dans un excellent travail sur l'ensemble de la question de l'absorption par notre atmosphère de toutes les radiations qui constituent la chaleur rayonnante, a accepté et confirmé le raisonnement de Forbes; et, après de nouvelles observations faites dans des conditions très favorables sur le mont Whitney, à 4500^{m} au-dessus du niveau de la mer, il a donné un nombre un peu plus grand encore que celui de Forbes (1,7 au lieu de 1,6 fois le nombre de Pouillet). Ainsi, la mesure de Langley pour le rayonnement solaire correspond à 135000 chevaux-vapeur par mètre carré au lieu de 78800 que nous avons adoptés, et diminue chacune de nos périodes dans le rapport de 1 à 1,7. Donc, au lieu des 20 millions d'années qu'a indiquées Helmholtz en s'appuyant sur l'évaluation de Pouillet, nous n'en avons que 12 millions; il faut traiter de même toutes les évaluations de durée basées sur les résultats de Pouillet. Dans

---

(1) *Edin. New Phil. Journal*, t. XXXVI, 1884.
(2) *American Journal of Science*, t. XXVI, mars 1883.

ces conditions, en faisant complètement entrer en compte toutes les probabilités relatives à un accroissement de la densité dans l'intérieur du Soleil, et à une activité plus ou moins grande du rayonnement dans les âges passés, il serait, je crois, excessivement téméraire d'admettre comme probable que la lumière du Soleil ait brillé pendant plus de 20 millions d'années dans le passé de l'histoire de la terre, ou de compter pour l'avenir sur plus de 5 ou 6 millions d'années de lumière.

Nous avons vu que le Soleil ne tire d'aucune source extérieure la chaleur qu'il rayonne d'une année à l'autre, et que toute son énergie calorifique est due à l'attraction mutuelle qui s'exerce entre ses parties, d'après la loi Newtonienne de la gravitation. Nous avons vu comment un mécanisme idéal, qu'il est facile d'imaginer et de comprendre bien que nous soyons infiniment loin de pouvoir le réaliser, pourrait régler le travail accompli par l'attraction mutuelle entre toutes les parties de la masse qui se contracte, de manière à engendrer réellement la quantité de chaleur équivalente dans un océan de liquide incandescent couvrant la surface du Soleil, et à le maintenir ainsi incandescent malgré une continuelle émission de chaleur au taux actuel de l'activité calorifique solaire. Examinons maintenant d'un peu plus près les forces et les mouvements qu'il y a réellement lieu de considérer dans le refroidissement progressif dû au rayonnement de la région externe du Soleil, dans la descente vers l'intérieur du liquide ainsi refroidi et dans les phénomènes qui en résultent, c'est-à-dire le mélange de toutes les parties de la masse du Soleil, la diminution de la résistance élastique à la pression dans des parties où la densité conserve la même valeur, et la condensation de la masse entière sous l'influence de la gravitation. Je dois expliquer d'abord que cette *résistance élastique à la pression* est due à la chaleur, et n'est autre chose que ce que j'ai nommé, au cours de cette conférence, le *mouvement répulsif* de Sir Humphry Davy (p. 247). Je l'ai ainsi nommé parce que Davy a employé d'abord l'expression de *mouvement répulsif* pour définir de subtils mouvements intra-moléculaires auxquels il attribuait, ainsi que d'autres fondateurs de la théorie cinétique

de la chaleur, la résistance élastique à la compression présentée par les gaz et les liquides.

Imaginez, au lieu des atomes et des molécules des diverses substances qui constituent la masse du Soleil, un très grand nombre de globes élastiques, semblables aux billes des écoliers ou à des billes de billard. Supposons d'abord que quelques millions de billes semblables soient placées, en un endroit quelconque de la terre, dans une chambre assez grande pour en contenir mille fois plus qu'il n'y en a, et dont les murs et le plafond seraient parfaitement durs, tandis que le plancher serait un plancher véritable, en bois; ou, ce qui conviendrait beaucoup mieux à notre objet, supposons que le plancher soit une feuille élastique d'acier, supportée par des solives assez rapprochées les unes des autres pour qu'elle ne puisse fléchir en aucun point. Supposons que les billes reposent d'abord sur le plancher. Dans ces conditions, elles représentent les atomes d'un gaz, l'oxygène, l'azote ou l'hydrogène par exemple, absolument dépourvus de chaleur, et par suite gelés (1), ou une poussière moléculaire répandue sur le fond du vase qui la contient.

Si maintenant on place une lampe sous l'oxygène, l'azote ou l'hydrogène, la substance, grâce à la chaleur qui lui arrive par conductibilité à travers le plancher, va abandonner cet état de solide absolument froid, ou de poussière moléculaire sans cohésion, et se répandra à la manière d'un gaz à travers tout l'espace limité par les parois de l'enceinte. Si la chaleur communiquée par la lampe devient de plus en plus grande, la pression que le gaz exerce dans toutes les directions, contre la paroi interne de l'enceinte, deviendra de plus en plus forte.

Revenons maintenant à notre chambre dont le plancher est jonché de billes, et demandons à des ouvriers de passer sous le plancher et de le frapper fortement en un grand nombre d'endroits avec des maillets; nous réaliserons ainsi une représentation mécanique grossière de cet échauffement d'un gaz par la chaleur émanée d'une lampe et traversant par conductibilité le fond de l'enceinte qui le contient. Les billes en contact immédiat avec le plancher commenceront à rebondir

(1) A la température de zéro absolu. (P. L.)



et retomberont vivement (il se produit quelque chose d'analogue au moment où de l'eau, placée dans un vase sur le feu, va commencer à bouillir). Si les ouvriers frappent assez fort, le tas de billes éprouvera des commotions de plus en plus violentes jusqu'à ce que chacune des billes se soit mise à exécuter des vibrations irrégulières, dans un sens vertical, horizontal ou oblique, mais dans une direction qui n'est pas fixe, et, grâce aux chocs des billes les unes contre les autres, le tas va se boursoufler jusqu'à ce que le plafond de la chambre s'oppose à un plus grand boursouflement. Supposons maintenant que le plancher devienne, comme les parois et le plafond, absolument rigide. Les ouvriers peuvent cesser de donner leurs coups de marteau, qui maintenant ne réussiraient pas plus à augmenter les mouvements des billes qu'une lampe ne réussirait à échauffer le contenu d'un vase, si ce vase était fait d'une matière idéale imperméable à la chaleur. Les billes, qui sont parfaitement élastiques, continueront toujours ([1]) à se répandre dans la chambre, heurtant les murs, le plancher et le plafond et se heurtant entre elles; elles conserveront, dans leur ensemble, une distribution constante en moyenne, en vertu de laquelle elles seront plus rapprochées les unes des autres immédiatement au-dessus du plancher, et de moins en moins rapprochées à mesure qu'on s'élèvera vers le plafond.

Dans cet état moyen et permanent, la vitesse moyenne des

([1]) Pour justifier cette proposition, je dois prévenir le lecteur qu'il faut attribuer, de façon ou d'autre, à ces billes idéales parfaitement élastiques que nous imaginons ici, une structure telle que chacune d'elles ne prenne qu'une fraction déterminée en moyenne de la quantité d'énergie qui lui revient, étant donnée celle de la masse tout entière, de sorte qu'en moyenne il y a une proportion d'énergie constante dans les mouvements de translation des billes; le reste est de l'énergie de mouvements vibratoires ou rotatoires des parties de chaque bille. Nous supposons aussi, pour plus de simplicité, que les billes sont parfaitement polies et sans frottement, afin de pouvoir les considérer comme privées des mouvements rotatoires que des chocs avec frottement communiqueraient à des billes véritables. Voici, d'après Clausius, auquel nous devons cette contribution essentielle à la théorie cinétique des gaz, les proportions des deux espèces d'énergie pour les gaz ordinaires : les translations représentent les $\frac{3}{5}$, et les vibrations les $\frac{2}{5}$ de l'énergie totale. (W. T.)



molécules sera la même dans toute la masse, du plafond au plancher, et sera la même dans toutes les directions, soit verticales soit inclinées. Ces chocs continuellement répétés contre tous les points des parois ou du plafond équivaudront, dans leur ensemble, à une pression continue qui sera proportionnelle à la densité moyenne de la masse en ce point. La diminution de la pression et de la densité en partant du plancher sera justement la même que celle de la densité et de la pression de notre atmosphère, en supposant que la température soit la même à toutes les hauteurs, d'après la formule et les Tables bien connues qui permettent de bien mesurer les hauteurs au moyen du baromètre.

En réalité, la température de l'atmosphère n'est pas uniforme dans toutes les couches, mais, d'après des observations faites en ballon par feu M. Welsh, de Kew, à des hauteurs très diverses, elle s'abaisse à raison de 1° environ pour 162^{m}, quand on s'élève verticalement dans l'air libre, loin des montagnes. Cet abaissement de la température quand on s'élève dans notre atmosphère terrestre est très important et très suggestif au point de vue de la constitution de l'atmosphère du Soleil, et non seulement de cette atmosphère ou enveloppe extérieure, mais de la masse fluide tout entière, dont elle est la continuation. Les deux cas se ressemblent tellement, qu'il y a dans chacun d'eux perte de chaleur par les parties supérieures de l'atmosphère, grâce au rayonnement vers l'espace, et que par conséquent il se produit, à travers le fluide continu, des courants par lesquels le mélange intime des parties inférieures et supérieures est constamment réalisé. Dans le cas de l'atmosphère terrestre, les couches inférieures enlèvent, par contact, sa chaleur à la terre solide, qui a été échauffée pendant le jour par le rayonnement solaire. Si l'on prend la moyenne des effets du jour et de la nuit, comme l'air pris dans sa masse ne s'échauffe pas, il doit rayonner vers l'espace toute la chaleur qu'il acquiert; celle qu'il prend à la terre par contact, et par rayonnement, et ce qu'il intercepte de la chaleur rayonnée par le Soleil vers la terre. Dans le cas du Soleil, la chaleur rayonnée par la partie extérieure de l'atmosphère est entièrement tirée de l'intérieur. Dans les deux cas, la

masse fluide tout entière est brassée par des courants qui entraînent vers le bas le fluide refroidi et amènent vers le haut du fluide plus chaud qui, après s'être refroidi, redescendra à son tour.

Les gaz, et en général les fluides (à part quelques cas spéciaux, celui de l'eau au voisinage de son point de congélation, notamment, dans lesquels le liquide se contracte sous pression constante quand la température s'élève), possèdent la propriété bien connue d'éprouver des élévations et des abaissements de température lorsqu'on les condense ou qu'on les raréfie en augmentant ou diminuant leur pression par une action extérieure dans des conditions où le gaz ne peut ni prendre ni céder de la chaleur aux corps extérieurs. Ainsi une certaine quantité d'air ou d'un autre gaz, pris à la température ordinaire (c'est-à-dire à 15° C.) et dont le volume devient double, se refroidit de 71°; si le volume est augmenté jusqu'à avoir 32 fois sa valeur initiale, il se refroidit encore de 148°; sa température descendra donc à 200° au-dessous de zéro environ, ou à 73° de température absolue. Des changements de cette importance ont réellement lieu dans les masses d'air qui s'élèvent au sein de l'atmosphère à des hauteurs de 8 ou 9 kilomètres, ou de 20 ou 25 kilomètres. Il y a certainement, au sein de la masse fluide du Soleil, des différences de température correspondantes, mais de grandeurs très différentes, à cause de la valeur 27 fois plus grande de la pesanteur à la surface du Soleil, de l'étendue de l'espace dans lequel le fluide circule librement, et enfin, et ceci n'est pas une des moindres raisons, à cause de l'énorme température du fluide solaire, température qui est de beaucoup supérieure à celle des régions de l'atmosphère terrestre où la densité a la même valeur. Ces idées sur la constitution du Soleil ont été développées avec un grand talent, au point de vue mathématique, par M. J. Homer Lane, de Washington, U. S. A., dans un très important travail lu devant l'Académie nationale des Sciences des États-Unis, et publié avec de nouveaux développements dans *American Journal of Science*, pour juillet 1870. M. Lane, au moyen de considérations mathématiques rigoureuses, détermine la loi de distribution de la densité et de la tempéra-

ture au sein d'un globe gazeux homogène abandonné à lui-même dans l'espace, et perdant sa chaleur par rayonnement avec une lenteur assez grande pour que les courants qui transportent la chaleur ne produisent que de faibles altérations de la forme globulaire.

Un résultat très remarquable et très important auquel il est parvenu est que la densité au centre est environ 20 fois ([1]) la densité moyenne, et cela que la masse soit grande ou petite, qu'elle soit constituée par de l'oxygène, de l'azote, de l'hydrogène, ou toute autre substance; il faut seulement que le gaz soit le même dans toute la masse, et que la densité des parties centrales ne soit pas trop grande pour empêcher la condensation de se produire conformément à la loi ordinaire de la compressibilité des gaz, c'est-à-dire en raison directe de la pression à température constante. Nous savons que cette loi se vérifie à peu près avec l'air ordinaire, avec chacun de ses principaux composants, l'oxygène et l'azote pris séparément, et avec l'hydrogène, considérés sous des densités 200 fois plus grandes environ que celle qu'ils ont sous la pression atmosphérique ordinaire. Mais quand la force de compression est suffisamment accrue, leur résistance à la condensation devient plus grande que ne l'exigerait la loi de proportionnalité à la densité, et il semble très probable qu'il y a pour chaque gaz une limite au delà de laquelle la densité ne peut être augmentée par une compression, aussi énergique qu'on la suppose. Lane remarque que la densité au centre du Soleil serait « supérieure de près du tiers de sa valeur à celle du platine métallique », si la loi des gaz s'appliquait aux éléments de la masse du Soleil jusqu'à un aussi grand degré de condensation; mais il ne donne pas cette supposition comme probable, et il partage sans doute l'opinion générale, d'après laquelle, selon toute probabilité, les éléments de la masse du Soleil, aux températures qui correspondent à leur position dans l'intérieur, ne suivent la loi simple de la compressibilité des gaz que dans un espace relativement petit, s'étendant de

([1]) En résolvant d'une manière indépendante le problème de Lane, j'ai trouvé que le nombre exact doit être très voisin de 22,5.

la surface vers l'intérieur et sont, dans les régions centrales, beaucoup moins condensées que ne l'exigerait cette loi. D'après elle, la densité du Soleil en son centre serait 31; nous pouvons admettre comme très probable qu'elle n'atteint pas cette valeur, bien qu'elle soit de beaucoup supérieure à la densité moyenne 1,4. Il y a là une très grande incertitude, mais il serait peu sage aujourd'hui d'en resserrer les limites, dans l'ignorance où nous sommes des principaux éléments de la masse totale du Soleil, ainsi que des lois que suivent, sous de très fortes pressions et à de très hautes températures, la pression, la densité et la température même des substances que nous connaissons.

Quant à savoir si le Soleil devient plus froid ou plus chaud, c'est là une question extrêmement complexe; à la vérité, la question et la réponse sont également paradoxales, à moins qu'on ne définisse exactement la région dont on veut évaluer la température. Si l'on demande comment varie d'âge en âge, dans le Soleil, la température de portions de la masse solaire ayant la même densité, la réponse est certaine; toute portion de la masse du Soleil dont la densité a une valeur déterminée, une valeur égale à celle de la densité normale de notre atmosphère, par exemple, se refroidit de plus en plus, et cela quelle que soit sa place dans le fluide, et quelle que soit la loi de compressibilité du fluide, que ce soit la loi simple relative aux gaz, ou toute autre loi intermédiaire entre celle-là et l'incompressibilité absolue. Mais la profondeur à laquelle on peut trouver une densité déterminée diminue à mesure que la condensation s'accentue; il peut donc se faire qu'à des distances égales de la surface, la température devienne de plus en plus élevée. Cela serait certainement vrai si la loi de compressibilité des gaz s'appliquait partout; mais même alors la température réelle de la surface rayonnante en vertu de laquelle le Soleil répand sa chaleur dans l'espace pourrait s'abaisser, parce que les températures des portions qui conservent la même densité s'abaissent évidemment dans tous les cas.

Laissons ces questions compliquées et difficiles aux savants qui se sont voués à l'étude de la Physique solaire, et consi-

dérons celle-ci, qu'il est plus aisé de comprendre : quelle est à un instant quelconque la température du centre du Soleil, et comment varie cette température avec le temps? Si nous revenons de quelques millions d'années en arrière, à une époque où nous pouvons croire que le Soleil était gazeux jusqu'au centre, il est certain que la température centrale doit avoir augmenté depuis lors; de plus, s'il y avait un noyau solide, comme c'est possible, quoique peu probable actuellement, mais comme cela peut probablement se produire dans l'avenir, la température du centre s'élèverait probablement; dans ce cas en effet, la conduction de la chaleur vers l'extérieur à travers le solide serait trop lente pour compenser l'effet thermique de l'accroissement de pression dû à l'augmentation de la gravité du liquide qui se condense autour du solide. Mais dans l'histoire d'un globe entièrement fluide, primitivement assez raréfié pour être gazeux en tous ses points et qui se condense sous l'influence de l'attraction mutuelle de ses parties et d'un rayonnement de chaleur vers un espace ambiant froid, il arrive un moment où les parties centrales sont assez condensées pour opposer à une condensation nouvelle une résistance beaucoup plus grande que celle qui satisfait à la loi simple de la compressibilité des gaz; il me paraît certain que la première période de réchauffement, dont l'existence a été démontrée par Lane, Newcomb et Ball, doit prendre fin à ce moment, et que la température du centre doit commencer à s'abaisser à cause du refroidissement déterminé par le rayonnement de la surface, et du mélange du fluide refroidi avec les parties internes.

Nous arrivons maintenant à la partie la plus intéressante de notre sujet, l'histoire ancienne du Soleil. Il y a 5 ou 10 millions d'années, il pouvait avoir un diamètre double de son diamètre actuel, et une densité moyenne égale au huitième de sa densité moyenne actuelle, ou à 0,175; mais nous ne pouvons pas, sans risquer de tomber dans l'improbable, pousser nos raisonnements ou nos spéculations beaucoup au delà. Nous ne pouvons, cependant, nous empêcher de nous demander quel était l'état de la matière du Soleil, avant qu'elle s'agglomérât et devînt chaude. Cette matière pouvait

appartenir à deux solides froids, qui se sont heurtés avec la vitesse due à leur attraction mutuelle; ou, ce qui est infiniment moins probable, avec des vitesses beaucoup plus grandes que celles qui seraient dues à cette attraction. Désignons, pour abréger, les deux corps par A et B; cette dernière supposition exige que le mouvement relatif du centre d'inertie de B par rapport à A ait été, quand les deux corps étaient encore très éloignés, dirigé de façon à amener ce point à passer très exactement par le centre d'inertie de A; si exactement, que le moment de rotation [1] après le choc fût juste suffisant pour permettre au Soleil d'acquérir, après s'être condensé jusqu'au point où nous le voyons, la faible rotation qu'il a actuellement. Cette direction excessivement exacte d'un corps vers un autre, pour ainsi dire, est, d'après la théorie des probabilités, excessivement improbable. D'autre part, il est certain que deux corps A et B, en repos dans l'espace, abandonnés à eux-mêmes sous l'action de leur gravitation mutuelle seule, et soustraits à toute influence perturbatrice, éprouveront dans leur rencontre un choc direct; par conséquent leur centre d'inertie n'aura pas de mouvement après la collision, et le corps qu'ils constitueront par leur

---

[1] Le texte porte *rotational momentum, or « moment of momentum »*; nous avons traduit par *moment de rotation*. Le terme *momentum* désigne proprement le produit mv de la masse par la vitesse, ce que nous appelons quantité de mouvement. *Moment of momentum* représente donc l'intégrale Σmvr étendue à toute la masse, r désignant la distance à l'axe de rotation de la masse m, et v la vitesse perpendiculairement à l'axe. Sir W. Thomson explique de la manière suivante, dans une note, l'expression *moment of momentum*. (P. L.)

« C'est une expression technique qui représente en Dynamique l'importance du mouvement relativement à une révolution ou à une rotation autour d'un axe. *Momentum* est un terme adopté il y a cent cinquante ans environ (à l'époque où les mathématiciens et les autres savants parlaient et écrivaient en latin) pour désigner l'importance d'un mouvement de translation. *Moment of a couple, moment of a magnet, moment of inertia, moment of force round an axis, moment of momentum round an axis*, et les combinaisons de mots correspondantes en français et en allemand, sont des expressions qui ont été introduites dans les soixante dernières années (par des savants parlant leur langue maternelle), pour désigner l'importance de l'élément spécial considéré dans chaque cas. L'expression *moment of momentum* est extrêmement heureuse et commode en Dynamique, et constitue un curieux monument philologique de l'histoire scientifique. »



réunion n'aura pas de moment de rotation. Nous voyons ainsi que la probabilité du choc entre deux corps voisins, pris dans un grand nombre de corps doués d'attractions mutuelles et répartis dans l'espace à de grandes distances les uns des autres, est beaucoup plus grande si tous ces corps sont en repos que s'ils se meuvent au hasard dans toutes les directions et avec des vitesses considérables par rapport à celles qu'ils acquerraient s'ils venaient à se choquer après être partis du repos. A ce propos, il est très intéressant de remarquer que l'Astronomie stellaire, si magnifiquement secondée récemment par le spectroscope, a montré que les mouvements relatifs des étoiles visibles et de notre Soleil sont généralement très faibles en comparaison de la vitesse (612^{km} par seconde) qu'acquerrait un corps en tombant jusqu'à la surface du Soleil, et sont comparables à la vitesse assez faible ($29^{km},5$ par seconde) de la Terre sur son orbite dans sa révolution autour du Soleil [1].

---

[1] Un corps partant de l'infini et tombant vers un centre fixe de masse μ a acquis, à une distance R du centre, une vitesse

$$v = \sqrt{\frac{2\mu}{R}}.$$

Si l'on prend comme unité de longueur le rayon terrestre (6370^{km}) et comme unité de masse la masse de l'unité de volume d'eau à 4° C. (ou $\frac{1}{8}$ du cube circonscrit à la Terre), la masse de la Terre est 23; celle du Soleil,

$$23 \times 35 \times 10^4 = 805 \times 10^4.$$

Faisons $\mu = 805 \times 10^4$ et $R = 112$ (rayon du Soleil), il vient $v = 830$. Or la durée de révolution de la Terre est

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{a^3}{\mu}} \quad \text{ou} \quad 7980,$$

a désignant le demi grand axe de l'orbite terrestre, ou 235×10^2. Cette durée étant d'ailleurs de 31536×10^3 secondes, l'unité au moyen de laquelle est exprimé T vaut $\frac{31536 \times 10^3}{7980}$, ou 3950 secondes environ; la vitesse v, en kilomètres par seconde, est donc $380 \times \frac{6370}{3950}$, ou 612.

La vitesse de la Terre sur son orbite, $\frac{2\pi a}{T}$ ou $\sqrt{\frac{a}{\mu}}$, est environ $\frac{1}{20}$ de la précédente. (P. L.)

Pour fixer les idées, imaginons deux globes solides froids, dont chacun ait la même densité moyenne que la Terre et un diamètre égal à la moitié du diamètre solaire; supposons-les au repos, ou presque au repos, et éloignés l'un de l'autre de deux fois la distance de la Terre au Soleil. Ils tomberont l'un vers l'autre, et se heurteront au bout d'une demi-année exactement. Le choc durera environ une demi-heure, dans le cours de laquelle ils se transformeront en une masse fluide incandescente violemment agitée, qui s'élancera hors de la ligne que suivaient les corps avant le choc, se gonflera, et acquerra un volume égal à plusieurs fois la somme des volumes primitifs des deux globes (¹). Jusqu'à quelle distance la masse fluide va se répandre tout autour de cette ligne, il est impossible de le dire. Le mouvement est trop compliqué pour pouvoir être complètement étudié par aucune des méthodes mathématiques connues; mais avec assez de patience un mathématicien pourrait arriver à le calculer en approchant assez de la vérité. La distance atteinte par le bord circulaire extrême de la masse fluide sera probablement inférieure à la distance parcourue par chacun des globes avant le choc; en effet, le mouvement de translation des molécules qui constitue la chaleur en laquelle s'est transformée dans le premier choc toute l'énergie due à la chute originelle des deux globes, absorbe probablement les $\frac{3}{5}$ environ de cette quantité totale d'énergie. La durée du mouvement transversal du fluide sera sans doute inférieure à une demi-année; au bout de ce temps la masse commencera à retomber vers l'axe. Un peu moins d'un an après le premier choc le fluide sera de nouveau dans un état de condensation maxima autour du centre, et

(¹) De tels phénomènes semblent se produire de temps en temps dans l'Univers. « Quelquefois, dit Laplace, on a vu des étoiles se montrer presque tout à coup, et disparaître après avoir brillé du plus vif éclat. Telle fut la fameuse étoile observée en 1572, dans la constellation de Cassiopée. En peu de temps, elle surpassa la clarté des plus belles étoiles, et de Jupiter même; sa lumière s'affaiblit ensuite, et elle disparut seize mois après sa découverte, sans avoir changé de place dans le ciel. Sa couleur éprouva des variations considérables, elle fut d'abord d'un blanc éclatant, ensuite d'un jaune rougeâtre, et enfin d'un blanc plombé. » [LAPLACE, *Système du Monde* (*Œuvres*, t. VI, p. 58).]



cette fois il sera probablement plus agité encore qu'il ne l'était immédiatement après le premier choc; il s'élancera alors de nouveau, mais cette fois dans la direction de l'axe, et vers les régions d'où les deux globes sont tombés. Il retombera encore et, après une série d'oscillations rapidement amorties et de plus en plus rapides, il prendra probablement, au bout de deux ou trois ans, la forme d'une étoile globulaire ayant à peu près la même masse, la même chaleur et le même éclat que notre Soleil actuel, mais qui en différera en ce qu'elle n'aura pas de rotation.

Nous avons supposé que les globes étaient au repos, lorsqu'ils se sont précipités l'un sur l'autre d'une distance égale au diamètre de l'orbite terrestre. Supposons maintenant qu'au lieu d'être au repos, ils aient été animés de mouvements perpendiculaires à la ligne qui les joint et de directions opposées, leur vitesse relative étant de 2^{m} par seconde (ou, plus exactement, de $1^{m},89$). Le moment de rotation total autour d'un axe passant par le centre de gravité des deux globes et perpendiculaire à leurs trajectoires est juste égal au moment de la rotation du Soleil autour de son axe. On démontre facilement cette loi élémentaire de la Dynamique, savoir qu'aucune action mutuelle entre différentes parties d'un système de corps ou d'un seul corps rigide, flexible, ou fluide, ne peut altérer le moment de la quantité de mouvement de l'ensemble. La vitesse transversale est tellement faible, dans le cas actuel, qu'aucun des caractères principaux du choc et des oscillations violentes dont nous l'avons vu suivi n'éprouvera d'altération sensible; il en sera de même pour la grandeur, la température et l'éclat de la masse résultante; mais, au lieu d'être dépourvue de rotation, elle tournera autour d'un axe en vingt-cinq jours, et sera ainsi en tout semblable à notre Soleil.

Si au lieu d'être d'abord en repos, ou de se mouvoir avec les faibles vitesses que nous avons considérées, chacun des globes avait une vitesse transversale de $\frac{3}{4}$ de kilomètre par seconde (ou un peu plus de $0^{km},71$ par seconde), ils éviteraient exactement le choc, et décriraient, dans une période d'une année, des ellipses autour de leur centre d'inertie commun,

chacun d'eux effleurant la surface de l'autre chaque fois qu'ils parviendraient aux points où leurs orbites seraient le plus voisines.

Si la vitesse initiale de chacun des globes perpendiculairement à la ligne qui les joint était inférieure, mais d'assez peu, à $0^{km},71$ par seconde, le choc serait accompagné d'un violent frôlement, et deux soleils brillants, globes solides baignés d'un fluide enflammé, naîtraient dans le cours de quelques heures; ils commenceraient à tourner autour du centre d'inertie du système en décrivant des ellipses allongées en un peu moins d'une année. Une action mutuelle s'exerçant entre les deux corps, et déterminant des phénomènes du genre des marées, diminuerait les excentricités de leurs orbites, et, si elle se prolongeait assez longtemps, leur ferait décrire des circonférences autour du centre d'inertie commun, la distance de leurs surfaces étant égale à 6,44 fois leur diamètre commun [1].

---

[1] Considérons, d'après les données, deux globes de masse $\frac{\mu}{2}$, que nous supposerons réduits à leurs centres, et placés à une distance $2a$ l'un de l'autre (notations de la note précédente). Chacun d'eux se meut comme s'il était attiré par une masse $\frac{\mu}{8}$ placée au centre de gravité commun des deux globes (milieu de la droite de jonction), ce point conservant dans l'espace une position fixe.

Si les corps n'ont pas de vitesse initiale, ils se rencontreront, par raison de symétrie, au centre de gravité commun que chacun d'eux atteindra au bout d'un temps $\pi\sqrt{\frac{a^3}{\mu}} = \frac{T}{2}$, ou une demi-année. La durée d'une demi-heure est un peu supérieure à la durée de chute d'un corps dont la distance initiale au centre attirant serait la moitié du rayon actuel du Soleil, $\frac{R}{2} = 56$.

Supposons que ces globes aient reçu des vitesses initiales égales et opposées perpendiculaires à la droite de jonction initiale; ils décriront des ellipses ayant pour grand axe cette droite, et pour foyer commun, le centre de gravité commun; le demi grand axe de la trajectoire est $a' = \frac{\mu a}{2\mu - 8av_0^2}$; le rayon vecteur minimum, $b = \frac{4a^2v_0^2}{\mu - 4av_0^2}$; la durée de révolution, $T' = 2\pi\sqrt{\frac{8a'^3}{\mu}}$. Le moment de rotation initial de chaque globe autour d'un axe passant par le centre de gravité commun est, en appelant r le rayon des globes, $\frac{\mu}{2}\left(av_0 + \frac{2}{5}r^2\frac{v_0}{a}\right)$. Mais, avec les données actuelles, les formules se simplifient, car $4av_0^2$ est négligeable



Choisissons encore un cas particulier pour fixer les idées; supposons que 29 millions de globes solides fixes, ayant chacun à peu près la même masse que la Lune, et dans leur

---

devant μ, comme $\frac{r^2}{a}$ devant a. Le facteur de transformation des vitesses est $\frac{3950}{6370} = 0,62$; la vitesse relative de 2^m par seconde (vitesse absolue de 10^{-3} kilomètres) est donc, en unités convenables, 62×10^{-5}; celle de $0^{km},71$ est 44×10^{-2}, et celle de $0^{km},75$ est 465×10^{-3}. On a alors le Tableau suivant :

Vitesses initiales v_0	$1^m (62 \times 10^{-5})$	$0^{km},71 (44 \times 10^{-2})$	$0^{km},75 (465 \times 10^{-3})$
Rayon vect. min. $b = \frac{4a^2v_0^2}{\mu}$.	105×10^{-6}	53	59
Moment de rotation initial $\frac{\mu}{2} a v_0$	$\frac{\mu}{2} \times 14,5$	$\frac{\mu}{2} \times 10340$	

On voit que pour $v_0 = 1^m$, il y a un choc violent; pour $v_0 = 0^{km},71$, un violent frôlement ($b = 53$ rayons terrestres), et pour $v_0 = 0^{km},75$, le choc est à peine évité ($b = 59$ rayons terrestres).

En radiants par unité de temps de ~~3590~~ 3050 secondes, la vitesse angulaire de rotation du Soleil autour de son axe est $\omega = 115 \times 10^{-4}$; son moment de rotation $(\mu \times \frac{2}{5} R^2 \times \omega)$ a pour valeur 58μ. Le moment total des globes, lancés avec la vitesse relative de 2^m, est $14,5\mu$ ou $\frac{1}{4}$ du précédent.

Supposons, dans le cas de la vitesse de $0^{km},71$, la trajectoire devenue circulaire grâce à l'action de marée, et soit xr le rayon de cette trajectoire; la vitesse angulaire de révolution est $\frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{\mu}{8(xr)^3}}$; si nous admettons que cette action a donné à chacun des globes une rotation sur lui-même de vitesse égale à la vitesse de révolution, le moment de rotation résultant autour de l'axe passant par le centre d'inertie commun est, pour chaque globe, $\frac{\mu}{2}\left(\frac{4}{5} r^2 + r^2 x^2\right)\sqrt{\frac{\mu}{8(xr)^3}}$. En l'égalant au moment initial $\frac{\mu}{2} a v_0$, et remplaçant les lettres par leur valeur, nous aurons, tous calculs faits,

$$0,8 + x^2 = 1,38\sqrt{x^3}.$$

Posons $x = y^2$, nous avons, pour déterminer x, l'équation du quatrième degré

$$y^4 - 1,38 y^3 + 0,8 = 0,$$

qui a deux racines réelles comprises entre $1,04$ et $1,05$, ce qui comprend x entre $1,08$ et $1,10$, et la distance des surfaces entre $\frac{8}{100}$ et $\frac{1}{10}$ du diamètre commun.

Les résultats donnés par Sir W. Thomson sont différents; il indique comme moment de rotation de l'étoile simple (vitesse relative de 2^m) le moment de rotation du Soleil; dans le cas de l'étoile double, la distance des surfaces est, d'après

ensemble une masse égale à celle du Soleil, soient répandus aussi uniformément que possible sur une surface sphérique d'un rayon égal à 100 fois le rayon de l'orbite terrestre, et

---

lui, 6,44 fois le diamètre commun (ou le rayon de la trajectoire circulaire, 7,44 fois le rayon des globes). Or, si l'on double les vitesses, en considérant de plus la première comme *absolue* et non *relative*, le moment de rotation de l'étoile simple devient égal à celui du Soleil; dans le cas de la vitesse de $0^{km},71$ par seconde, l'équation du quatrième degré devient

$$y^4 - 2,757y^3 + 0,8 = 0$$

et a deux racines réelles; la première, à rejeter, est comprise entre 0 et 1, et la seconde, qui convient au problème, entre 2,71 et 2,72; elle donne pour x une valeur comprise entre 7,34 et 7,39, ce qui est, sauf une légère différence explicable par l'indétermination des données, le nombre de Sir W. Thomson. Il semble donc que l'auteur ait calculé, par erreur, les moments de rotation avec des vitesses autres que celles qu'il indique.

La réduction de l'excentricité à zéro par l'action de marée entraîne une perte d'énergie. La demi-force vive initiale des deux globes (si nous prenons comme état initial celui où ils passent par leurs positions initiales au début de l'action de marée) est $\frac{1}{2}\mu a v_0^2 = 7324856 \times 10^4$, en prenant $v_0 = 88 \times 10^{-2}$ (vitesse doublée); le carré de la vitesse de révolution, $\sqrt{\frac{\mu}{8r^3x^3}}$, est $\omega_1^2 = 147 \times 10^{-6}$; la demi-force vive dans le mouvement circulaire, ou $\frac{\mu}{2}\left(\frac{4}{5}r^2 + r^2x^2\right)\omega_1^2$, est 1001952×10^2; la différence, ou 7315×10^7, représente, en unités de travail, le travail de l'action de marée. Comparées aux unités C.G.S., les unités fondamentales du système employé sont :

Longueur........................	6370×10^5
Masse...........................	$(6370)^3 \times 10^{15}$
Temps...........................	3950

L'unité de travail, définie comme en C.G.S., est donc

$$(6370)^3 \times 10^{15} \times \left(\frac{6370}{3950}\right)^2 \times 10^{10} = 672 \times 10^{34};$$

l'équivalent de la grande calorie étant 417×10^8 en C.G.S. sera, dans le système adopté, $\frac{417 \times 10^8}{672 \times 10^{34}} = 62 \times 10^{-28}$; l'équivalent thermique du travail des marées est donc $\frac{7315 \times 10^7}{62 \times 10^{-28}} = 118 \times 10^{35}$; c'est l'équivalent de

$$\frac{118 \times 10^{35}}{1,7 \times 2,7 \times 10^{30}} = 3,277 \times 10^6,$$

ou 3277000 années de rayonnement solaire (*voir* p. 228 et 252).

(P L.)

abandonnés en ce point dans un état de repos absolu. Ils commenceront tous à tomber vers le centre de la sphère et s'y rencontreront au bout de 250 ans ([1]); chacun de ces globes, qui sont au nombre de 29 millions, sera, dans l'espace d'une demi-heure, fondu et porté à une température de quelques centaines de mille ou d'un million de degrés centigrades. La masse fluide ainsi formée se résoudra avec explosion en vapeur ou en gaz, grâce à cette prodigieuse chaleur. La surface, au moment de la première expansion, s'éloignera du centre d'une quantité très inférieure à 100 fois le rayon de l'orbite terrestre. Il s'ensuivra une série d'oscillations décroissantes, et le globe, se contractant et se dilatant ainsi alternativement pendant trois ou quatre cents ans, peut-être, finira par conserver un rayon égal à 40 fois celui de l'orbite terrestre ([2]). La densité moyenne de la nébuleuse gazeuse ainsi formée serait 215×10^{-14}; elle serait donc 636000 millions de fois plus petite que la densité moyenne du Soleil, ou 454000 millions de fois plus petite que celle de l'eau; ou un cinq cent soixante-dix millionième de celle de l'air ordinaire à la température de 10° centigrades. La densité de la région centrale, sensiblement uniforme sur plusieurs millions de kilomètres, est 20000 millions de fois plus petite que celle de l'eau (*voir* la note p. 258); ou un vingt-cinq millionième de celle de l'air. Cette densité extrêmement faible est sensiblement égale à 6 fois la densité de l'oxygène et de l'azote laissés dans quelques-uns des réci-

---

([1]) On sait que l'action d'une couche sphérique homogène sur un point de sa surface est égale à la moitié de l'action d'une masse égale à celle de la couche, et qui serait tout entière condensée au centre. Chacun des 29 millions de globes se meut donc comme un point attiré par un centre fixe de masse $\frac{\mu}{2}$; la distance initiale au centre étant $a \times 10^2$, la durée de la chute est

$$2\pi\sqrt{\frac{a^3 \times 10^6}{16\mu}} = 250 \times 2\pi\sqrt{\frac{a^3}{\mu}}$$

ou 250 ans. (P. L.)

([2]) Le rayon d'une nébuleuse globulaire gazeuse permanente constituée par un gaz homogène est les $\frac{40}{100}$ du rayon de la surface sphérique de laquelle ses éléments devraient se détacher pour avoir, quand ils auraient pris leur position actuelle dans la nébuleuse, la même énergie cinétique que cette dernière.

pients où Bottomley avait fait le vide, dans ses expériences sur la quantité de chaleur émise en vertu du rayonnement seul par les corps fortement chauffés. Si la substance était de l'oxygène, ou de l'azote, ou tout autre gaz ou mélange de gaz simples ou composés, ayant une densité spécifique égale à celle de notre atmosphère, la température du centre serait 51200° C. et la vitesse moyenne de translation des molécules serait égale à $6^{km},7$ par seconde, ou au produit par $\sqrt{\frac{3}{7}}$ de 10,2, vitesse acquise par un corps pesant tombant sans résistance de la surface extérieure (40 fois le rayon de l'orbite terrestre) au centre de la masse nébuleuse.

La nébuleuse gazeuse ainsi constituée se contracterait pendant quelques millions d'années, grâce à un rayonnement de chaleur continuel, jusqu'à acquérir les dimensions de notre Soleil actuel, si elle avait exactement la même puissance calorifique et lumineuse que le Soleil, mais pas de mouvement de rotation.

Le moment de rotation du système solaire entier vaut environ 18 fois le moment de rotation du Soleil, celui de Jupiter étant les $\frac{17}{18}$ et celui du Soleil $\frac{1}{18}$ du moment total; les autres corps ne méritent pas d'être pris en considération dans le calcul du moment de rotation.

Supposons maintenant que, au lieu d'être absolument en repos au début, les 29 millions de lunes aient chacune un faible mouvement, de telle sorte que leur ensemble ait autour d'un certain axe un moment de rotation égal au moment de rotation du système solaire que nous venons de considérer, ou même un moment beaucoup plus considérable, pour tenir compte de la résistance du milieu. Elles tomberont les unes sur les autres en 250 ans, et quoique ne se rencontrant pas exactement au centre comme dans le premier cas, où leur mouvement initial était nul, elles seront si serrées les unes contre les autres au bout de 250 ans, qu'il y aura des myriades de chocs, et que ces 29 millions de globes seront fondus et réduits en vapeur par la chaleur dégagée dans ces chocs. La vapeur ou le gaz ainsi engendré s'élancera vers l'extérieur et, après avoir passé pendant plusieurs centaines ou plusieurs milliers d'années par des alter-

natives de contractions et d'expansions successives, pourra se transformer en une nébuleuse tournante aplatie, étendant son rayon équatorial bien au delà de l'orbite de Neptune, et possédant un moment de rotation égal ou supérieur à celui du système solaire. C'est justement là le point de départ admis par Laplace pour sa théorie de l'évolution du système solaire; cette théorie, fondée sur l'histoire naturelle de l'univers stellaire, telle que l'a observée le premier des Herschel, et complétée dans ses détails par le profond sens dynamique et le génie imaginatif de Laplace, semble avoir été convertie par la Thermodynamique en une vérité nécessaire, si l'on borne les suppositions incertaines à cette hypothèse que les matériaux constituant à présent la matière brute du système solaire ont obéi pendant 100 millions d'années aux lois de la matière brute. Ainsi, il peut en réalité n'y avoir pas plus de mystère ou de difficulté dans l'évolution, automatique en quelque sorte, du système solaire à partir de l'état de diffusion de la matière froide dans l'espace, jusqu'à l'ordre et à la beauté qu'on y voit maintenant, développés par la lumière et la chaleur de son éclatant Soleil, qu'il n'y en a dans le remontage d'une horloge et son fonctionnement jusqu'au moment où elle s'arrête (1). J'ai à peine besoin de dire que l'origine et la continuation de la vie sur la terre sont absolument et infiniment en dehors des saines spéculations de la Science Dynamique. La seule contribution apportée par la Dynamique à la Biologie théorique est la négation absolue d'un commencement automatique ou d'une continuation automatique de la vie.

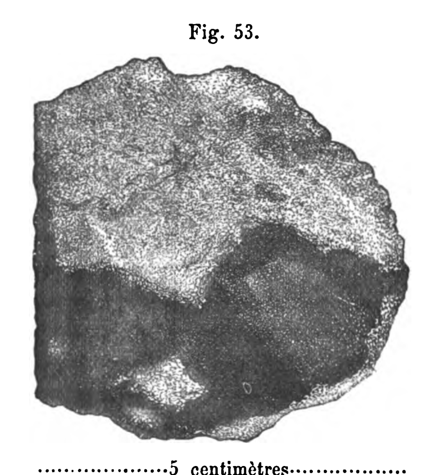
Je dirai seulement, pour conclure : en supposant la masse du Soleil composée de matériaux qui étaient éloignés les uns des autres avant qu'il s'allumât, elle devait constituer, immédiatement avant l'incandescence, soit deux corps différant seulement dans leurs proportions et leurs densités de ceux que nous avons pris comme exemples, soit des corps en

---

(1) Et même dans ceci, et dans toutes les propriétés de la matière que cela implique, il y a assez et trop de mystère pour notre intelligence limitée. Un ressort de montre dépasse notre entendement bien plus qu'une nébuleuse gazeuse.

nombre supérieur à deux, mais en nombre fini, au plus égal au nombre d'atomes contenus dans la masse actuelle du Soleil; ce nombre fini (qui doit être assez probablement compris entre 4×10^{57} et 140×10^{57}) est aussi facile à comprendre et à imaginer que les nombres 4 et 140. Immédiatement avant l'incandescence, la totalité des éléments constituants du Soleil pouvait être dans un état de division extrême, c'est-à-dire à l'état d'atomes séparés; ces éléments pouvaient aussi constituer un plus petit nombre de groupes d'atomes, agglomérés en petits cristaux ou groupes de cristaux (des

Fig. 53.



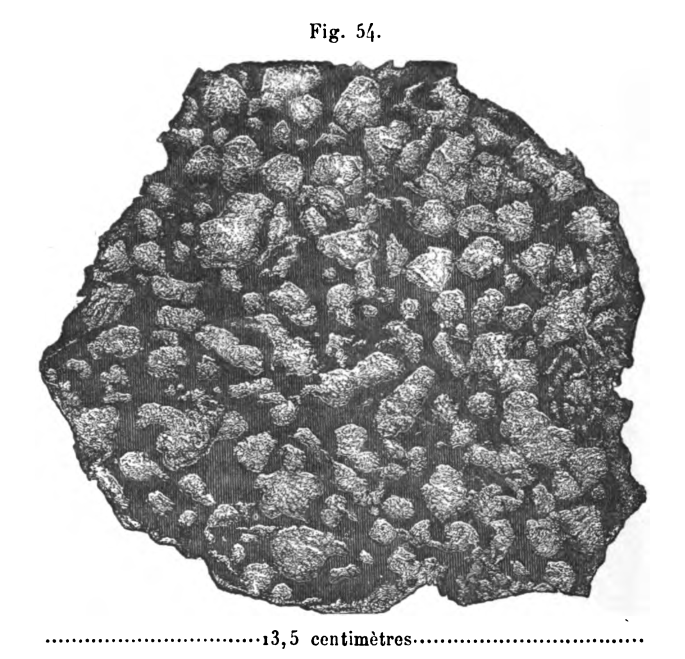
....................5 centimètres..................

flocons de neige de matière, pour ainsi dire); ou bien ils pouvaient former de petits tas de matière semblables à des pavés; ou encore semblables à cette pierre [1] (*fig.* 53) que vous pourriez prendre par erreur pour un pavé, mais qui a réelle-

[1] Ces trois météorites appartiennent au *Hunterian Museum* de l'Université de Glasgow, et les gravures (*fig.* 53, 54 et 55) ont été exécutées d'après les pièces elles-mêmes, gracieusement mises à ma disposition dans ce but par le conservateur du Muséum, le professeur Young. La pièce représentée par la *fig.* 53 appartient à la collection Hunter, celle de la *fig.* 54 à la collection Eck, et celle de la *fig.* 55 à la collection Lanfine; on a indiqué pour chacune d'elles une échelle de dimension. On peut remarquer que la *fig.* 54 représente une sec-

ment voyagé à travers l'espace jusqu'au moment où elle est tombée sur la terre à Possil, au voisinage de Glasgow, le 5 avril 1804; ou à celle-ci (*fig.* 54) qui a été trouvée dans le désert d'Atacama, dans l'Amérique du Sud, et que je crois être tombée du ciel, morceau de fer et de pierre qui semble avoir été formé par la solidification d'un mélange de sable et de fer fondu en un endroit où la pesanteur était très faible;

Fig. 54.



..............................13,5 centimètres..................................

ou encore à ce splendide morceau de fer cristallisé (*fig.* 55), plaque enlevée au célèbre aérolithe tombé à Lenarto, en Hongrie (¹); ou à cette pièce, admirable de forme (dont les

---

tion de la météorite par un plan contenant le plus long de trois axes rectangulaires; les endroits clairs sont des cristaux d'olivine grands et bien formés, empâtés dans un ciment de fer. Dans la *fig.* 55 sont représentées les belles marques de Widmanstätten caractéristiques de tous les fers météoriques, et si nettes dans la météorite bien connue de Lenarto.

(¹) *Voir* la note précédente.

figures 56 et 57 donnent deux aspects), moulage de la météo-

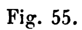
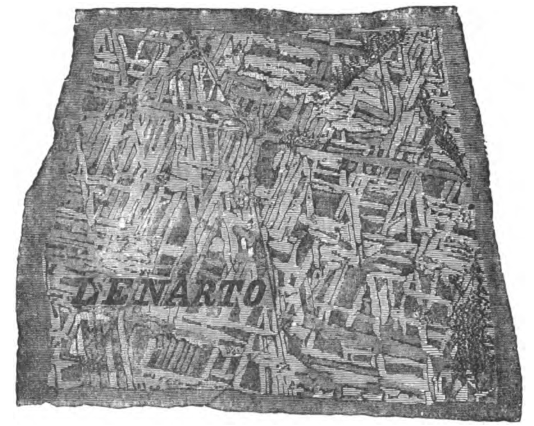
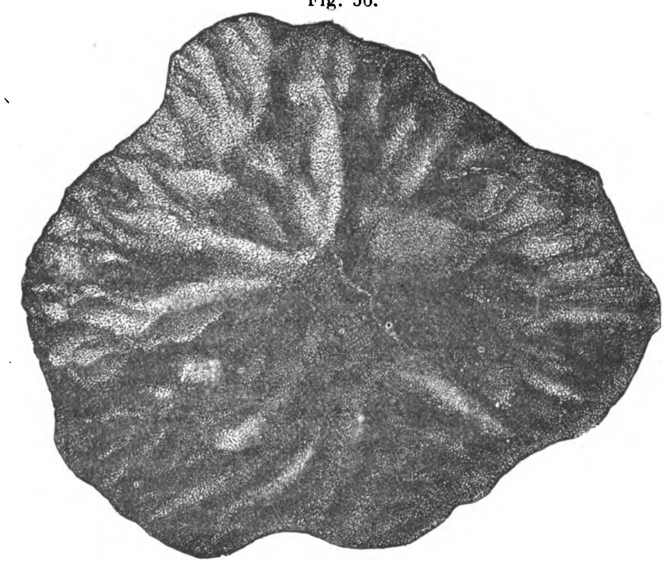


Fig. 55.



....9,25 centimètres....... ....

Fig. 56.



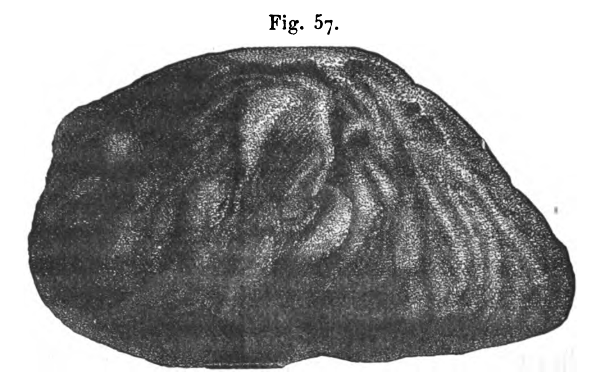
......................................15 centimètres......................................

rite de Middlesburgh (que m'a obligeamment donné le pro-

fesseur A.-S. Herschel), et qui présente des plissements montrant comment la matière en fusion s'est écartée de la partie antérieure de la surface, dans sa course finale à travers l'atmosphère terrestre, quand on la vit tomber le 14 mars 1881, à $3^h 35^m$ après midi.

Il est indifférent pour la théorie du Soleil que la matière qui le constitue ait pris l'une ou l'autre de ces formes immédiatement avant qu'il devînt incandescent, mais je ne puis jamais penser à l'état initial de cette matière sans me rappeler une question que me posa il y a trente ans feu l'évêque Ewing, évêque d'Argyll et des Iles : « Imaginez-vous que cette masse de matière ait été dès l'origine ce qu'elle est mainte-

Fig. 57.



nant; qu'elle ait été créée telle qu'elle est, ou qu'elle soit restée toujours dans cet état dans l'espace, jusqu'au moment de sa chute sur la terre? » Je lui avais dit que, dans mon opinion, le Soleil avait été formé par des pierres météoriques, mais il ne fut satisfait que lorsqu'il eut appris ou pu imaginer ce que sont ces pierres. Je ne pus que partager son opinion au sujet de l'impossibilité qu'il y a à imaginer qu'une quelconque des météorites semblables à celles qui sont sous vos yeux ait toujours été ce qu'elle est à présent, ou que les matériaux qui forment le Soleil aient été semblables à elle pendant tout le temps qui a précédé leur agglomération et leur élévation de température. Cette pierre a sûrement une histoire pleine d'événements, mais je n'abuserai pas de votre

patience en essayant en ce moment de conjecturer ce qu'elle a pu être. Je me bornerai à dire, en terminant, que nous ne pouvons qu'accepter l'opinion générale, d'après laquelle les météorites sont des fragments détachés de masses plus grandes qui se sont brisées; mais pour satisfaire entièrement notre curiosité, il faudrait essayer d'imaginer quel a été le passé de ces masses.

Énergies mécaniques du système solaire (Thomson, 1854).

	Énergie potentielle de gravitation jusqu'à la surface actuelle du Soleil.		Énergie cinétique du mouvement de rotation ou de révolution autour du centre du Soleil.	
	En kilogrammètres.	Nombre d'années d'entretien de la radiation solaire au taux actuel.	En kilogrammètres.	Nombre d'années d'entretien de la radiation solaire au taux actuel.
Soleil..................	**0**	0	**132** $.10^{33}$	116 ans 6 jours
Planète fictive de 10^{21} *kilogrammes de matière circulant à la surface même du Soleil*.......	**0**	0	**0**,01 $.10^{33}$	3 *jours*
Mercure...............	**7**,75 $.10^{33}$	6 ans 214 jours	**0**,047 $.10^{33}$	15,2
Vénus	**95** $.10^{33}$	83 227	**0**,306 $.10^{33}$	98,5
Terre.................	**107** $.10^{33}$	94 303	**0**,251 $.10^{33}$	80,7
Mars	**14**,3 $.10^{33}$	12 252	**0**,022 $.10^{33}$	7,0
Jupiter....	**36600** $.10^{33}$	32240	**16**,3 $.10^{33}$	14 ans 144
Saturne...............	**10900** $.10^{33}$	9650	**2**,67 $.10^{33}$	2 127
Uranus	**1830** $.10^{33}$	1610	**0**,221 $.10^{33}$	71,2
Neptune...............	**2140** $.10^{33}$	1890	**0**,166 $.10^{33}$	53,3
	Jusqu'à la surface de la Terre.		Par rapport au centre de la Terre.	
Lune	**0**,000039 $.10^{33}$	3 heures	**0**,00000326 $.10^{33}$	1 minute 48
Terre..................	0	0	**0**,0000195 $.10^{33}$	9 minutes 03
Total.........	**51700** $.10^{33}$	**45589** ans	**152** $.10^{33}$	**134** ans

Observations.

Les nombres du Tableau original (sauf la seconde ligne) ont été convertis de *livres-pieds* en kilogrammètres en multipliant par le facteur 0,136 (= 0,454 × 0,305).

Les énergies internes, tant potentielles (mécanique, physique et chimique) que cinétiques, de tous les corps du système solaire, supposés immobiles, sont naturellement inconnues. On n'a pu calculer que les énergies potentielles dues à l'attraction universelle rapportée aux centres de gravité des corps, les forces vives de révolution du centre de gravité autour du Soleil (et de la Terre pour la Lune) et les forces vives de rotation sur eux-mêmes du Soleil, de la Terre et de la Lune. Pour cette dernière évaluation, il faudrait même connaître la répartition des densités internes de ces corps. A cause de l'accroissement de la densité avec la profondeur, Sir W. Thomson a adopté le produit du carré du rayon externe par un tiers de la masse au lieu des deux cinquièmes, qu'il faudrait employer si la densité était uniforme.

M. B.

XI.

MESURES ÉLECTRIQUES.

Discours prononcé devant la Section de Mécanique aux conférences tenues a propos de l'Exposition spéciale d'appareils scientifiques, au South Kensington Museum, le 17 mai 1876, sous la présidence du Dr C.-W. Siemens.

Origine des mesures absolues. — Résistance en valeur absolue éloctromagnétique. — Résistance en valeur absolue électrostatique. — Étalons de l'Association britannique. — Électromètre portatif : différents modèles exposés.

Les débuts des mesures électriques datent, je crois, des mesures de forces électrostatiques faites par Robinson à Édimbourg et par Coulomb à Paris. Les grands résultats qu'on en a déduits ont montré de quelle importance sont les mesures exactes pour les progrès de la connaissance scientifique dans toutes les branches de la Physique. Les premiers électriciens se sont contentés de décrire les phénomènes, attractions et répulsions, éclairs et étincelles; et ce qu'ils nous ont donné de plus semblable à une mesure, est la longueur de l'étincelle dans certaines circonstances, les autres circonstances dont peut dépendre cette longueur restant en dehors de la mesure. Les expériences de Robinson et de Coulomb ont établi la loi de la force électrostatique, d'après laquelle deux petits corps tous deux chargés d'une quantité constante d'électricité, exercent l'un sur l'autre une action qui est répulsive ou attractive suivant que leurs électricités sont de même nom ou de nom contraire, et qui varie en raison inverse du carré de la distance, quand on fait varier la distance des deux corps.

En Physique, les mesures se font généralement par l'une

ou l'autre de ces deux méthodes : une méthode qui consiste à ramener les appareils à une position de zéro et qu'on appelle méthode *de zéro,* et une méthode dans laquelle on mesure une quantité qui varie d'une manière continue. On voit des applications de cette dernière méthode dans les expériences de Coulomb et de Robinson, où l'on détermine la loi suivant laquelle varie la force électrique quand la distance entre les corps qui s'influencent mutuellement varie d'une manière continue. L'autre manière de disposer les expériences de mesure est applicable à un phénomène extrêmement important, se rapportant à la théorie de l'électricité, je veux dire la disparition de la force électrique à l'intérieur d'un conducteur. Ces deux méthodes de mesures ont été mises en pratique par Cavendish d'une manière très remarquable. Par l'intermédiaire de son directeur, le professeur Clerk Maxwell, le laboratoire Cavendish de Cambridge va pouvoir, grâce à la parenté établie par cette dénomination entre le laboratoire de Physique de l'Université de Cambridge et le généreux fondateur de l'institution, le duc de Devonshire, faire connaître des résultats très intéressants : les manuscrits de Cavendish qui étaient jusqu'à présent restés dans sa famille, et qui sont aujourd'hui, je crois, la propriété du duc de Devonshire, ont été remis par lui entre les mains du professeur Clerk Maxwell avec mission soit de les publier en entier, soit d'en extraire tout ce qui pourrait présenter aujourd'hui un intérêt scientifique ([1]). Tous ont eu sans aucun doute un grand intérêt scientifique autrefois. Je crois que même maintenant une grande partie de ces manuscrits paraîtra très intéressante; et quelques paroles prononcées ces jours derniers par le professeur Clerk Maxwell, quand il était ici pour l'ouverture de ce congrès, m'ont appris qu'on trouve dans ces manuscrits beaucoup plus de choses qu'on ne l'aurait jamais imaginé; on y a trouvé en

---

([1]) Ils ont été publiés par l'imprimerie de l'Université de Cambridge dans un Volume daté de 1879, et intitulé : *The Electrical Researches of the Honourable Henry Cavendish, F. R. S., written between* 1771 *and* 1781; *edited from the original manuscripts in the possession of the Duke of Devonshire, K. G., by J. Clerk Maxwell, F. R. S.*

Les annotations de J. Clerk Maxwell sont très importantes. (M. B.)

particulier un système complet de mesures électriques, fondé sur la mesure de la capacité électrostatique. L'idée même de mesurer la capacité électrostatique dans des conditions scientifiquement déterminées est due, comme on le sait aujourd'hui, à Cavendish. Il y a bien des années, en 1846 ou 1847, quand les manuscrits de Cavendish étaient entre les mains de Sir Wm. Snow Harris, à Plymouth, j'ai moi-même trouvé, dans une boîte pleine de manuscrits non classés, une note qui me surprit excessivement. Elle contenait la description et le résultat d'une expérience destinée à mesurer la capacité électrostratique d'un disque circulaire isolé. C'est un des cas dans lesquels la théorie fondée par Robinson et Coulomb et développée par les mathématiciens venus après eux permet de calculer *a priori* le résultat; j'ai constaté que ce résultat, si j'ai bonne mémoire, s'accorde avec la mesure de Cavendish à $\frac{1}{200}$ près. En mentionnant les mesures de forces électrostatiques de Coulomb et Robinson, qui nous ont fait découvrir la loi de la force, et les mesures de Cavendish portant sur la capacité électrostatique, c'est-à-dire sur le sujet le moins connu généralement, et considéré comme le plus difficile de tous en électricité, j'en ai dit assez pour montrer que les physiciens de notre siècle ne peuvent pas revendiquer l'honneur d'être les initiateurs des mesures électriques.

Les écrits de Cavendish contiennent aussi des exemples de la première des méthodes de mesure dont j'ai parlé, la méthode de réduction à zéro. Il est très curieux que, tandis que Coulomb et Robinson découvraient la loi de l'inverse du carré des distances en mesurant directement une quantité qui variait d'une manière continue, Cavendish, sans connaître leurs travaux, ait conclu d'un raisonnement mathématique très serré, que la loi devait, ou être celle de l'inverse du carré de la distance, ou s'écarter de cette loi d'une manière déterminée, suivant que, dans un cas particulier qu'il a défini, on observait une force électrique absolument nulle, ou différente de zéro. Comme cela résulte nettement de ses écrits, Cavendish croyait qu'on trouverait une force rigoureusement nulle si l'on faisait l'expérience; mais avec la circonspection qui le caractérisait, et qui convenait d'ailleurs à un philosophe et à un mathéma-

ticien consciencieux, il n'a jamais formellement énoncé la loi. Il possédait cette conscience scrupuleuse qui l'empêchait d'accepter sans preuves la conclusion à laquelle il était cependant logiquement conduit. Son esprit était probablement beaucoup plus prompt que ceux de bien d'autres savants qui se sont hâtés de conclure et ont donné le résultat comme démontré, mais il a consciencieusement évité de le donner comme tel, et il en a retardé l'énoncé jusqu'au moment où des mesures exactes auraient permis de savoir si, oui ou non, ce résultat était confirmé par l'expérience.

Voici quel était l'objet de la mesure dans cet exemple de méthode de zéro indiqué par Cavendish. Si, dans l'intérieur d'un conducteur creux électrisé, la force électrostatique exercée sur un petit corps isolé et électrisé (un corps infiniment petit) est rigoureusement nulle, la loi de variation de la force électrique doit être la loi de l'inverse du carré des distances. D'autre part, si l'on observe une répulsion entre un petit corps électrisé positivement et les parois du conducteur creux électrisé positivement, la force varie plus que ne l'indiquerait la loi de l'inverse du carré de la distance, et *vice versâ*, si le petit corps paraît repoussé par les parois du conducteur chargé d'une électricité de nom contraire à la sienne, la diminution de la force quand la distance augmente est un peu moindre qu'elle ne serait si elle suivait la loi indiquée. Il était réservé à Faraday de faire avec exactitude l'expérience qui a couronné la théorie de Cavendish ([1]). Faraday, par l'investigation la plus pénétrante, trouva que la force électrique était nulle dans le cas considéré, et justifia ainsi la mineure du syllogisme de Cavendish. La force électrostatique varie donc en raison inverse du carré de la distance. Ce résultat a été obtenu par Coulomb et par Robinson avec une exactitude bien moindre, parce que leur méthode ne comportait pas la même précision. C'est sur cette loi qu'est fondé le système entier des mesures

([1]) C'est la célèbre expérience de la cage de Faraday. Cavendish l'avait lui-même effectuée (*Electrical Researches*), et elle a été reproduite avec toute la précision que comportent les mesures modernes par Clerk Maxwell (notes) qui en a conclu que l'exposant de la distance ne peut différer de -2 que de $\pm 0{,}00003$. (M. B.)



électriques absolues. La théorie mathématique fournit l'unité électrostatique convenable, cette quantité d'électricité telle que, si deux corps en possèdent chacun une quantité égale, ils exercent l'un sur l'autre, à l'unité de distance, une force égale à l'unité de force. C'est sur cette définition qu'est fondé le système des mesures électrostatiques absolues.

D'autres expériences et séries d'expériences de Cavendish (je crois en effet que le professeur Clerk Maxwell va éditer une série complète d'expériences mesurant des quantités électrostatiques) ont conduit au système général des mesures électrostatiques absolues.

Mais il y a une autre catégorie importante de mesures électriques, celle qui s'adresse aux phénomènes électromagnétiques. On avait une complète connaissance des lois élémentaires de l'Électrostatique à l'exception de cette mineure du syllogisme de Cavendish, et de cette importante propriété particulière relative à l'induction électrostatique, découverte par Faraday et connue sous le nom de *pouvoir spécifique des diélectriques*. A l'exception de ces deux points, la théorie de l'Électrostatique était complète au siècle dernier. Nous n'avions plus qu'à développer les résultats mathématiques de la théorie de Cavendish, Coulomb et Robinson; ce n'est qu'au commencement de ce siècle que l'existence de la force électromagnétique a été connue. Œrsted découvrit en 1820 l'action qui s'exerce entre un aimant et un fil parcouru par un courant électrique; et les remarquables développements qu'Ampère donna très rapidement à cette grande découverte ont conduit à la création d'une autre branche importante de la Science électrique, et mis en lumière l'objet des mesures électromagnétiques, dont je dois vous dire quelques mots.

Les principes de la théorie mathématique de l'action mutuelle entre des fils transportant des courants électriques, et de leur action sur les aimants, ont été complètement établis par Ampère dans les développements qu'il a ajoutés à la découverte d'Œrsted. Cependant c'est en Allemagne que l'on a fait les premières mesures exactes de courants et, d'une manière générale, que l'on a établi le système de mesures fondé sur ces principes. Le grand travail de Gauss et Weber

sur le magnétisme terrestre est étroitement lié à ce sujet. C'est Gauss, je crois, qui a le premier indiqué le système de mesures absolues pour la force magnétique. Les définitions et la théorie magnétique de Poisson et de Coulomb relatives à la polarité magnétique, ainsi que la théorie de la force magnétique à laquelle elles servent de base, ont été pratiquement appliquées par Gauss et sont devenues le fondement du système tout entier de mesures magnétiques employé aujourd'hui dans nos observations magnétiques. C'était là un pas immense et très important au point de vue scientifique; car ces travaux nous ont donné non seulement des mesures définies, mais des mesures fondées sur une base absolue qui, même si tous les instruments ayant servi aux mesures étaient détruits, nous permettrait encore d'obtenir des résultats parfaitement définis. Le système des unités absolues fut appliqué pour la première fois, en Physique, à la suite de la création par Gauss du système relatif au magnétisme terrestre. C'est donc là le véritable début des mesures absolues en Magnétisme, en Électromagnétisme et en Électrostatique. Gauss et Weber ont exécuté ensemble le travail relatif au magnétisme terrestre, et Weber a appliqué seul, pendant la vie de Gauss et aussi après sa mort, je crois, le système des mesures absolues en Électrostatique. Un résultat très intéressant mis en évidence par Weber est le suivant : la résistance électrique d'un fil, pour les courants électriques qu'il transporte, doit être mesurée en fonction de certaines unités absolues, qui nous conduisent à définir comme une vitesse la résistance électromagnétique d'un fil, et à l'exprimer en unités de longueur par unité de temps. Il serait trop long d'entrer dans les détails, et de vous expliquer minutieusement comment il se fait que la résistance doive être mesurée par une vitesse. Cela paraît bizarre, mais vous pourrez de la manière suivante vous faire une idée très générale de la question. Imaginez deux barres verticales de cuivre et une petite barre transversale et horizontale placée de manière à presser sur les deux premières. Disposez le plan de ces deux barres perpendiculairement au méridien magnétique et placez la petite barre transversale perpendiculairement aux barres verticales, comme

un échelon d'échelle. Donnez-lui un mouvement rapide vers le haut; elle coupe les lignes de force dues à la composante horizontale de la force magnétique terrestre. D'après une des découvertes de Faraday, elle éprouvera un effet d'induction, en vertu duquel une de ses extrémités sera électrisée positivement et l'autre négativement. Relions maintenant par un conducteur les deux barres verticales contre lesquelles s'appuie cette barre horizontale : l'effet dont j'ai parlé donnera naissance à un courant. Ce courant pourra, comme dans l'expérience d'Œrsted, faire dévier l'aiguille d'un galvanomètre. Vous allez voir maintenant comment la résistance peut être mesurée par une vitesse. Supposons que la vitesse du mouvement de cette petite barre, déplacée vers le haut comme je l'ai dit, ait une valeur telle que la déviation du galvanomètre soit exactement de 45°. La vitesse qui produit cette déviation mesure la résistance du circuit, pourvu toutefois que les dimensions du galvanomètre satisfassent à certaines conditions déterminées ([1]). Le point essentiel de cette proposition est que le résultat est indépendant de la grandeur de la composante horizontale du magnétisme terrestre. L'aiguille du galvanomètre est dirigée par cette composante horizontale. Supposons qu'elle soit doublée; la force directrice qui agit sur l'aiguille est doublée, mais l'effet d'induction est doublé également, et, par conséquent, la vitesse qui fait dévier de 45° l'aiguille du galvanomètre, pour une valeur déterminée de la force magnétique terrestre, occasionnera encore la même déviation pour une valeur différente de cette force. Ainsi, indépendamment de toute mesure absolue de la force magnétique terrestre, une vitesse déterminée donne un résultat déterminé. C'est donc bien une vitesse qui mesure réellement la résistance opposée par un circuit métallique au flux d'électricité qui le traverse.

Arrivons maintenant à l'Électrostatique; la mesure de la résistance opposée par un isolant imparfait à la propagation

([1]) Il s'agit d'un galvanomètre semblable à la boussole des tangentes, mais n'ayant qu'un arc de fil de longueur égale au rayon, lui-même égal à la distance des deux barres parallèles (voir *Unités électriques*, p. 82). (M. B.)



de l'électricité peut être rattachée à une vitesse d'une manière curieuse. On peut la mesurer par l'inverse d'une vitesse ; ou, en d'autres termes, le pouvoir conducteur d'un fil peut être mesuré, relativement aux phénomènes électrostatiques, par une vitesse. Par exemple, imaginez qu'une sphère soit placée au centre de cette salle, et très loin des parois. Imaginez que cette sphère ait 2^m de diamètre, 1^m de rayon ; électrisez-la, et suspendez-la par un fin cordon de soie, parfaitement sec, de manière à l'isoler parfaitement. Nous avons là un globe parfaitement isolé, au milieu de cette salle. Appliquez maintenant sur la sphère l'une des extrémités d'un fil excessivement fin, un fil de $\frac{1}{400}$ de millimètre de diamètre, par exemple, et appliquez l'autre extrémité du même fil sur une plaque de métal reliée aux murs de la salle, ou encore, supposez que les murs de la salle soient métalliques, pour éviter les irrégularités qui seraient dues à des conducteurs imparfaits ; la sphère isolée perd instantanément toute son électricité par l'intermédiaire de ce fil très fin qui la relie aux murs de la salle. Par *instantanément* j'entends que dans un temps tellement court qu'aucune méthode connue ne permettrait de le mesurer, en un millionième de seconde par exemple, la sphère perdrait toute son électricité, si on la reliait aux murs de la salle par 10^m ou 20^m du fil le plus fin que vous puissiez imaginer. Supposez maintenant que le fil soit un million de fois plus fin que le fil réel le plus fin que vous puissiez employer ; le même phénomène va se produire, mais sa durée augmentera en raison de l'amincissement du fil. Prenez encore un fil de coton, et employez-le à suspendre dans une enceinte à parois métalliques un globe semblable à celui que j'ai imaginé ; ce fil de coton mouillé enlèvera graduellement son électricité au globe ; dans un quart de minute peut-être le globe aura perdu la moitié de son électricité, dans un autre quart la moitié du reste, et ainsi de suite. Si la résistance du conducteur que j'ai imaginé est constante, la déperdition suivra la loi de l'intérêt composé, la même fraction de la charge disparaîtra dans chaque seconde. Imaginez maintenant qu'un conducteur de résistance parfaitement constante soit disposé entre le globe idéal et les murs métalliques de la salle, et

relié à un de ces électromètres, dont je dirai un mot en terminant, par un fil excessivement fin pénétrant dans l'instrument; supposez que l'électromètre indique un certain degré de *potentiel,* comme nous disons maintenant pour désigner cet élément que Cavendish a réellement découvert en exécutant ses mesures de capacité électrique. Supposons maintenant que nous mesurions la valeur électrique (le potentiel) de la charge du globe au moyen d'un électromètre; nous verrons, dans les conditions où nous sommes placés, les indications de l'électromètre accuser une diminution graduelle du potentiel, d'après la loi logarithmique, ou loi de l'intérêt composé. Mais, au lieu de ce qui vient d'être indiqué, considérons les conditions suivantes, que nous pouvons nous figurer, bien qu'aucun mécanicien ne puisse les réaliser. Supposons qu'un mécanisme imaginaire permette au diamètre du globe de diminuer régulièrement. Supposons d'abord que l'isolement soit excessivement parfait et que la résistance du fil conducteur soit énorme, de telle sorte que, dans l'espace d'une ou deux minutes, le potentiel ne baisse que d'une quantité très faible. Si maintenant ce globe, capable de se contracter ou de se dilater à volonté, se contracte de telle façon que son rayon passe de 100^{cm} à 90^{cm} que va-t-il arriver? Le potentiel va croître dans le rapport de 90 à 100. Si les dimensions linéaires du globe sont réduites de moitié, le potentiel deviendra double, et ainsi de suite. C'est là une conséquence de ce résultat de la théorie mathématique, d'après lequel la capacité d'une sphère est numériquement égale à son rayon. Maintenant, le globe étant chargé, supposons que son rayon diminue et que la contraction se fasse avec une vitesse telle que le potentiel reste constant. Vous pouvez dès lors imaginer que vous avez un globe perdant une quantité constante d'électricité dans chaque unité de temps; il est en effet maintenu à un potentiel constant, et un globe maintenu à un potentiel constant, grâce à ce mécanisme idéal qui lui permet de se contracter régulièrement, perdra une quantité d'électricité toujours la même dans chaque unité de temps, puisqu'il perdra des quantités égales d'électricité dans des temps égaux. Dans ce globe qui se contracte régulièrement de manière à con-

server un potentiel constant, la vitesse avec laquelle la surface approche du centre mesure le pouvoir conducteur du fil en mesure électrostatique absolue. Ainsi donc nous sommes conduits à ce très curieux résultat, à savoir que, d'après la loi électrostatique du phénomène, nous pouvons mesurer, en nous conformant aux principes de l'Électrostatique, le pouvoir conducteur d'un fil par une vitesse. Bien que je vous aie proposé un cas idéal, j'aurais grand tort de vous laisser croire que c'est là une sorte de mesure idéale; à vrai dire, nous mesurons régulièrement de cette manière la capacité des bouteilles de Leyde en mesure électrostatique; et à l'avenir, quand quelqu'un ira acheter chez un constructeur une bouteille de Leyde, il devra demander au constructeur de lui donner une bouteille d'une capacité de 1^m ou 2^m ou de toute autre valeur, et exiger qu'il sache la construire. C'est un avis que je donne à tous ceux qui s'occupent d'appareils électrostatiques ou de la fourniture des laboratoires. Il n'est pas probable que le constructeur comprenne, mais peut-être, si l'acheteur lui explique un peu ce qu'il veut dire, parviendra-t-il bientôt à se faire comprendre; et j'espère que dans dix ans, dans tous les magasins où l'on vend des bouteilles de Leyde, il y aura sur chacune d'elles une étiquette faisant connaître sa capacité en centimètres. Il pourrait en être ainsi demain. Nous avons tous les moyens d'y arriver, mais tout le monde ne les connaît pas.

La relation entre les mesures électrostatiques et les mesures électromagnétiques est très intéressante; elle nous conduit, du domaine des mesures minutieuses et exactes, que l'on croit dénué d'intérêt, jusqu'au cœur de la Science; elle nous conduit à scruter les grands secrets de la Nature. Les anciennes mesures faites à ce propos par Weber ont donné une détermination approchée de la vitesse particulière v pour laquelle la résistance électromagnétique est numériquement égale au pouvoir conducteur électrostatique d'un fil. Le degré particulier de résistance d'un fil tel que la vitesse qui mesure sa résistance en unités électromagnétiques soit égale à la vitesse qui mesure son pouvoir conducteur en unités électrostatiques a été déterminé par Weber, et Weber a trouvé que

cette vitesse v est environ 300000^{km} par seconde (il a trouvé en réalité un nombre un peu plus grand, 310740). Le professeur Clerk Maxwell a donné une théorie qui conduit à une théorie dynamique du magnétisme, et dont certains résultats lui ont fait croire que la vitesse pour laquelle ces deux mesures sont égales, comme je l'ai expliqué, serait la vitesse de la lumière. Cette brillante hypothèse a beaucoup attiré l'attention; elle présente un très grand intérêt, non seulement pour les mesures électromagnétiques et électrostatiques exactes (la mesure avec une grande exactitude de la relation entre les unités électrostatiques et électromagnétiques), mais aussi au point de vue des théories physiques. Jusqu'à présent, il semble que plus les expériences de ce genre deviennent exactes, et plus le résultat se rapproche de la vitesse de la lumière, mais nous devons réserver notre opinion jusqu'à ce que nous puissions l'affirmer. Pour que cette idée puisse être acceptée, il faut que l'accord soit beaucoup plus grand que ne l'ont montré les expériences faites jusqu'ici. Mais vous pouvez tous comprendre, par la simple indication d'un pareil sujet, combien doit être intense l'intérêt qui s'attache à la continuation de ces recherches; je crois que Maxwell fait en ce moment une mesure de cette espèce par une méthode différente de toutes celles qui ont été appliquées jusqu'ici. J'en ai trop dit pour ne pas parler un peu des méthodes employées dans ces recherches, mais, comme elles ont déjà été entièrement publiées, vous pourrez vous y reporter facilement.

En ce qui concerne les mesures électriques exactes, la théorie était de beaucoup dépassée par la pratique, et la présence de notre Président n'est pas nécessaire pour me rappeler combien les mesures de résistance exécutées pour la télégraphie pratique par son frère, le Dr Werner Siemens, et par lui-même ont été plus exactes, jusqu'à une époque tout à fait récente, que les mesures faites dans tous les établissements où l'on ne s'occupait que de science théorique.

Au cours des recherches scientifiques faites pendant les vingt premières années où le cuivre fut employé en télégraphie électrique, on n'avait pas découvert ce fait, que la conductibilité de différents échantillons de cuivre varie pratique-

ment de l'un à l'autre. En 1857 et 1858, j'ai examiné, dans mon laboratoire de l'Université de Glascow, des échantillons de fil de cuivre fournis par les fabricants pour le câble transatlantique et pour quelques câbles méditerranéens, et entre lesquels on ne soupçonnait pas la moindre différence; mes mesures m'ont fait voir que leurs conductibilités électriques présentaient des différences atteignant 37 pour 100, et ils étaient prêts à être employés comme conducteurs dans les câbles sous-marins! Et c'est quand des différences de cet ordre étaient négligées, quand leur existence même était inconnue des savants s'occupant d'électricité, que les créateurs des mesures exactes en télégraphie commençaient à construire des étalons de résistance électrique à l'aide desquels on put bientôt faire des mesures exactes à un millième!

Le Dr Werner Siemens et notre Président figurent parmi les premiers constructeurs d'étalons de résistance. L'unité Siemens est encore bien connue, et un grand nombre des mesures les plus importantes relatives aux câbles sous-marins ont été exprimées au moyen de cette unité. Par une coïncidence heureuse à un point de vue, bien que d'autre part il y ait quelque chose à dire, l'unité adoptée par MM. Siemens et fondée sur la mesure d'une certaine colonne de mercure, l'unité Siemens tant de fois reproduite dans leurs bobines de résistance, est assez voisine de l'unité qui dans le système de Weber serait 10^9 ou mille millions de centimètres par seconde. Grâce à cette coïncidence les mesures faites en unités Siemens sont très facilement réduites en mesures absolues.

La Commission nommée en 1861 par l'Association britannique a employé une méthode de mesure que j'ai moi-même proposée, et qui fut appliquée principalement par les professeurs Clerk Maxwell, Balfour Stewart et Fleeming Jenkin; cette Commission réalisa ce qu'on a appelé d'abord l'unité de résistance de l'Association britannique. Sur la proposition de M. Latimer Clark, on lui donna ensuite le nom d'*ohm* en souvenir de l'un des grands fondateurs de la science électromagnétique. Ohm ayant énoncé le premier la loi qui relie les courants à la force électromotrice, on a jugé convenable de donner son nom à cette unité électrique.

Je puis vous dire, comme un fait de grande importance et de haut intérêt pour la science physique, qu'on a entrepris une revision des mesures de l'Association britannique. On s'efforce en ce moment de mesurer avec la plus grande exactitude possible la valeur de l'unité de l'Association britannique en centimètres par seconde. Il s'en faudra certainement de peu qu'elle soit égale à 10000^{km} par seconde. La différence sera de 1 pour 100 peut-être; mais, naturellement, il est possible qu'elle atteigne 2 ou 3 pour 100 ou 4 pour 100, comme tout le monde peut s'en rendre compte en considérant les difficultés que l'on rencontre dans ces expériences. Je dirai seulement, à propos de cette détermination de l'ohm, qu'elle confine à un autre ordre de mesures, la mesure de la chaleur. Joule, dans une série d'expériences tout à fait indépendantes, et que je ne puis que signaler, employa un autre moyen pour arriver pratiquement à une mesure absolue de la résistance électrique. Son expérience électrothermique, rapprochée de ses expériences sur l'équivalent mécanique de la chaleur, est en léger désaccord avec la mesure que l'Association britannique a donnée de sa propre unité. Il y a ici un accord à établir. D'un côté Joule considère l'unité de l'Association britannique, l'ohm, comme trop faible; de l'autre côté, Kohlrausch, en Allemagne, pense que l'ohm dépasse un peu la valeur exacte de mille millions de centimètres par seconde. Je crois que, si l'on éliminait l'incertitude par la méthode des moyennes, les expériences de Joule et de Kohlrausch montreraient que l'unité de l'Association britannique est à très peu près exacte; mais je n'approuve pas ce moyen de lever les doutes, et nous ne serons satisfaits que lorsque Joule et Kohlrausch se seront mis d'accord (1).

Je vais maintenant mentionner un certain nombre d'expériences faites avec des électromètres qui, j'en ai peur, sont peu intéressants pour tout autre que pour moi. Voici le premier essai d'électromètre à quadrants. Il est bien connu aujourd'hui d'un grand nombre d'électriciens, et une brochure explicative a été publiée à son sujet. A la vérité, le

(1) *Voir* p. 87-88 ci-dessus.

Rapport de l'Association britannique sur les électromètres ayant été réédité avec la série complète de ses *Reports on Electrical Standards* [1], je ne crois avoir besoin d'entrer dans les détails à propos d'aucun de ces instruments. Celui qui est là, devant vous, est le premier électromètre portatif, et je vais vous dire comment il est venu au jour. J'en avais un dont, je rougis de le dire, j'étais très fier en ce temps-là. J'étais fier de sa petitesse et de la facilité avec laquelle il pouvait être monté au sommet du Goatfell [2] et redescendu; avant celui-ci, j'en avais un dont le caractère principal était de ne pas peser plus qu'un fusil. C'était au moment de ce que Lord Palmerston appelait « la fièvre du fusil », et j'en étais quelque peu atteint en ce temps-là, car j'étais « rifle volunteer ». Je trouvais que mon électromètre pesait une livre de moins que mon arme. Il ne pesait que $5^{kg},800$, et le fusil pesait $6^{kg},300$. J'avais cet électromètre au Congrès de l'Association britannique à Aberdeen en 1858, mais on n'a pu le retrouver aujourd'hui, bien qu'on l'ait cherché; sans cela il aurait figuré dans cette exposition. Voici devant vous une de ses parties, la garniture qui était à son extrémité supérieure. Voici celui qui l'a suivi immédiatement (*fig.* 57). J'avais réduit son poids de moitié, et j'en étais tout à fait satisfait. Celui-ci a été porté bien des fois au sommet du Goatfell; il est complètement décrit dans mon livre [3] et dans le Rapport dont j'ai parlé. Je le montrais une fois avec beaucoup de fierté au professeur Tait, et lui disais : « Vous devriez vous en procurer un semblable. — J'attendrai, me répondit-il, que vous en ayez fait un qui puisse se mettre dans la poche. Faites-en un de la grosseur d'une orange, et je l'aurai. » Telle est exactement l'origine de ce dernier électromètre portatif. Je me sentis défié par ces paroles, et pendant mon dernier voyage à Glasgow, M. White, qui est si infatigable quand il s'agit de faire des nouveautés et qui a une si admirable ingéniosité,

---

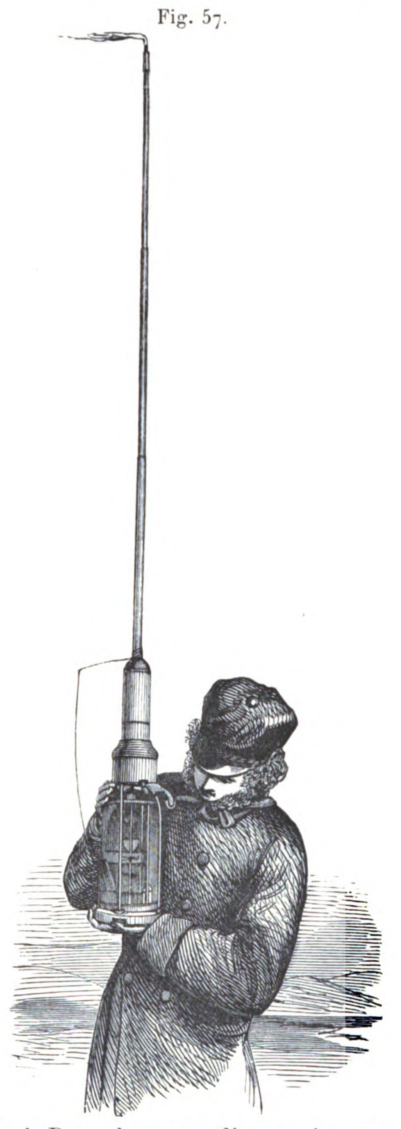
(1) London, E. et F.-N. Spon, 1873.

(2) La plus haute colline de l'île d'Arran, à peu de distance de Glasgow; l'altitude du sommet est de 902^m.

(3) *Papers on electrostatics and magnetism;* London, Macmillan, 1884.

m'a aidé dans mes efforts; nous avons fait quelque chose de

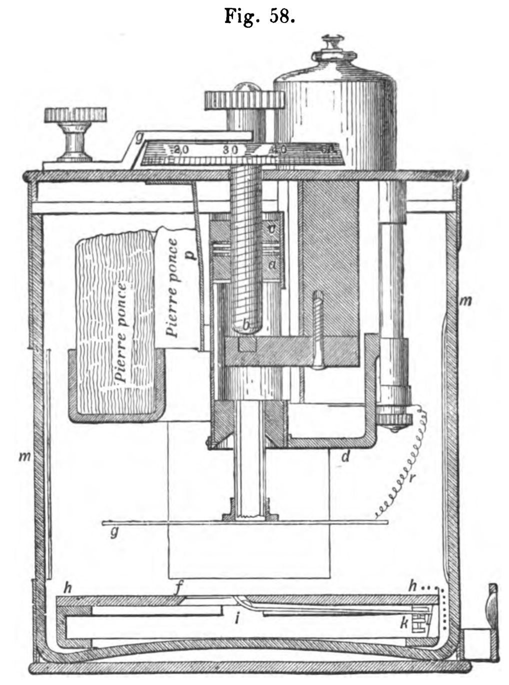
Fig. 57.



semblable à ceci. Dans le cours d'un mois, ce même électro-

mètre (*fig.* 58) fut mis en service. C'est le premier électromètre à disque attiré. Il ne diffère de l'électromètre portatif, tel qu'on le connaît aujourd'hui, que par quelques détails peu importants; le disque mobile est commandé par une vis micrométrique, au lieu de glisser dans une coulisse. Les deux instruments sont semblables en tout le reste, à l'exception de

Fig. 58.



Électromètre portatif, forme actuelle : $\frac{2}{3}$ de la grandeur.

cette fâcheuse disposition de la pierre ponce, qui avec les grandes précautions que je prends n'a pas occasionné d'accidents, mais qui, presque avec tout le monde, amènerait la destruction de l'appareil par l'acide sulfurique qui tomberait dedans à la moindre agitation. On emploie maintenant une disposition plus commode pour la pierre ponce, mais c'est, avec le mécanisme qui fait mouvoir le disque et qui est meil-

leur dans l'électromètre portatif actuel, la seule modification apportée à l'appareil primitif. Deux de ces instruments ont été emportés dans les expéditions arctiques (de 1875-1876) ([1]).

Un seul mot encore, un conseil pratique relatif aux électromètres. On m'a continuellement demandé comment il fallait faire pour les conserver en bon état, et j'ai recueilli bien des plaintes sur leur défaut de constance et sur la facilité avec laquelle ils perdent leur charge. Dans chacun de ces électromètres il y a une bouteille de Leyde en verre, le système hétérostatique étant adopté dans tous. Il est nécessaire que l'isolement soit parfait : donc tout dépend de la propreté et de la dessiccation de la surface du verre. Vous me permettrez d'employer la définition de Lord Palmerston : « la saleté, c'est ce qui n'est pas à sa place », et de remarquer que l'eau, ou une humidité quelconque sur la surface interne du verre, qui devrait être parfaitement sèche, est « une chose qui n'est pas à sa place » : c'est donc de la saleté; vous comprenez ce que je veux dire. S'il n'y a pas de saleté sur le verre, il est certain qu'il isolera bien. Mais comment rendre le verre parfaitement propre? Il faut le bien laver avec de l'eau et du savon. Si vous voulez, vous pouvez essayer l'acide nitrique, puis l'eau pure, ou encore le laver avec de l'alcool, puis avec de l'eau pure. J'ai presque dû avoir recours à des moyens magiques, pour ainsi dire, avant d'arriver à une propreté parfaite de la surface du verre, mais je doute fort que j'eusse jamais atteint le résultat cherché, si je n'avais employé le savon et l'eau, puis, après ce premier lavage, fait couler de l'eau sur la surface du verre. Lavez-le bien, d'une façon ou d'une autre. Vous pouvez vous servir des acides ou de l'alcool, si vous voulez ; mais, en général, vous trouverez, je crois, que le savon et l'eau, puis une quantité suffisante d'eau pure pour finir, réussiront autant que toute autre chose. Ensuite, secouez bien le verre, et séchez-le, mais pas avec un torchon, si propre qu'il soit.

([1]) On trouvera dans les *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. VII, p. 148 (1866), la description, malheureusement sans figures, de quelques électromètres de Sir W. Thomson. En consultant cet article, il faut, comme l'a d'ailleurs indiqué M. Joubert (*Ann.*, 5e série, t. XI, p. 86), rétablir *partout où il convient* le mot *potentiel* à la place du mot *charge*. (P. L.)



Faites tomber l'humidité en secouant, puis prenez un petit morceau de papier buvard, et faites-lui absorber avec beaucoup de soin toutes les petites particules d'eau qui pourraient être retenues par la cohésion, mais ne frottez avec aucun objet qui puisse laisser des lambeaux ou des fibres : c'est de la saleté. La plus fine batiste laissera sur le verre quelque chose qui répondra à la définition de Lord Palmerston. Quand vous aurez ôté de la surface du verre tout ce qui n'est pas de l'eau, séchez-le, et vous pouvez être sûrs que l'appareil fonctionnera bien. Le moyen de le dessécher et de le maintenir toujours sec est de mettre de l'acide sulfurique dans le récipient disposé à cet effet. Chacun de ces appareils est muni d'un réservoir pour l'acide sulfurique, qui doit être débarrassé de vapeurs volatiles par un procédé convenable; l'ébullition avec du sulfate d'ammoniaque suffit. Il n'est pas nécessaire que l'acide sulfurique soit chimiquement pur, mais il doit être débarrassé de vapeurs volatiles et très concentré. La cause la plus fréquente du défaut de constance de ces instruments est, je crois, l'insuffisance de la concentration de l'acide sulfurique; et très souvent, quand un électromètre ne fonctionne pas bien, on corrige parfaitement ce défaut en y mettant de l'acide plus concentré.

NOTES.

NOTE I.

SUR LES DIMENSIONS DES UNITÉS ÉLECTRIQUES,

PAR

M. BRILLOUIN.

Il me paraît nécessaire de mettre en garde le lecteur qui vient d'acquérir les notions contenues dans les deux conférences *Unités électriques* et *Mesures électriques* contre une séduction à laquelle bien peu échappent tout d'abord, mais dont presque tous comprennent la vanité en y réfléchissant : la doctrine des « Dimensions des unités » est exclusivement une doctrine de *Métrologie*, et nullement une doctrine de *Physique générale;* les dimensions des unités au moyen desquelles on mesure certaines quantités ne nous renseignent en *rien*, sur la nature physique de la quantité mesurée.

Aussi remarquera-t-on le soin que Sir W. Thomson met à employer des locutions telles que celle-ci : page 283, en bas : en unités électromagnétiques, c'est donc bien une vitesse qui *mesure* réellement la résistance; page 286 : en unités électrostatiques, nous pouvons mesurer le pouvoir conducteur d'un fil par une vitesse; il évite, sauf, dans quelques cas où l'intention particulière est facile à saisir, les locutions abrégées, qui comprises à la lettre sont inexactes : une résistance *est* une vitesse ou, ce qui est pire, *est de la nature* d'une vitesse. Non, une quantité d'électricité est une quantité d'électricité, et n'est en aucune manière réductible à une fonction

de masses, de longueurs et de temps; c'est une quantité d'une nature jusqu'à présent indépendante et primordiale, que nous ne pouvons ramener à aucune autre; et il en est, ou il en a été de même de toutes les autres quantités qu'on étudie en Physique.

Elles ne cessent d'être distinctes et irréductibles que du jour où des expériences incontestables en font des propriétés mécaniques d'une matière saisissable : telles sont la hauteur, l'intensité d'un son considéré dans le monde extérieur; encore irréductibles comme sensations physiologiques, la hauteur, l'intensité d'un son sont exprimées au point de vue physique comme l'inverse d'un temps, comme de l'énergie. La nature mécanique du phénomène nous est connue, les formules ne font que la traduire. De même, la couleur d'une lumière simple est aussi définie rigoureusement au point de vue physique par un temps, la période du phénomène vibratoire qui la constitue; mais, moins avancés que pour le son, nous ne pouvons encore être tout à fait affirmatifs sur la nature de ce phénomène périodique, si nous voulons n'avancer que ce que nous savons et non ce que nous pressentons qu'on saura bientôt. Malgré tout ce que nous savons de l'identité des radiations lumineuses et calorifiques, de la conversion du travail en chaleur, malgré l'opinion générale que tous les phénomènes calorifiques ne sont que des phénomènes mécaniques trop étroitement resserrés dans l'espace pour que nos yeux, même aidés des plus puissants microscopes, puissent les voir directement, qui oserait se montrer satisfait de l'hypothèse émise dans la théorie cinétique des gaz qui fait de la température une quantité d'énergie comme la chaleur elle-même? L'unité de température doit être considérée comme distincte et ajoutée aux autres unités indépendantes, de longueur, de temps et de masse.

Il en est de même en électricité et magnétisme; les lois que l'expérience a révélées font dépendre toutes les quantités électriques d'une seule d'entre elles, mais il en reste au moins une indépendante; un aimant permanent rigide et un solénoïde équivalents restent équivalents, quelque modification que l'on fasse subir au milieu matériel, et, par suite, à l'éther dans lequel ils sont plongés; un *certain* moment magnétique est équi-

valent au produit d'une *certaine* surface par une *certaine* intensité de courant, et aucune autre circonstance ne semble exercer d'influence. De même, la décharge à travers un fil d'une certaine quantité d'électricité paraît équivalente pour toutes les actions magnétiques ou inductrices, ou chimiques, au passage d'un certain courant pendant un certain temps, quelles que soient toutes les autres circonstances. Voilà ce que les expériences connues indiquent comme à peu près certain. Mais la force qu'exercent l'une sur l'autre deux masses électriques n'est pas indépendante des circonstances extérieures, du milieu dans lequel elles sont plongées; une formule qui ne tient pas compte de ces circonstances est incomplète; elle n'exprime pas tout ce qui influe sur le phénomène observé, et c'est un abus, au point de vue physique, de la prendre pour point de départ d'une formule de dimensions; nous ignorons en effet s'il y a homogénéité physique entre la force que nous mettons dans le premier membre et le produit des masses divisées par le carré de la distance que nous mettons dans le deuxième membre, terme qui, nous le savons, est incomplet. Ce que nous savons, c'est qu'il ne peut y avoir homogénéité physique entre les deux termes ainsi écrits, à la fois pour les actions électrostatiques et pour les actions magnétiques, qui obéissent aux mêmes lois tant qu'on néglige l'influence du milieu extérieur. De cette ignorance et de cette incompatibilité résultent des conventions provisoires qui peuvent laisser dans l'esprit une confusion qu'il faut dissiper.

La nature mécanique supposée complètement connue des phénomènes électriques et magnétiques, comme de tous les autres, comporte un système d'unités unique et déterminé, en fonction des unités mécaniques fondamentales de temps de longueur et de masse. Les lois que nous connaissons jusqu'à présent ne nous permettent pas de déterminer ce système, elles laissent arbitraire une des quantités électriques ou magnétiques. Au point de vue de la Physique générale, il faut s'y résigner, et la sincérité exige qu'on laisse cette indétermination en évidence; on écrira sans coefficients indéterminés toutes les lois qui expriment des équivalences entre quantités électriques et magnétiques; mais dans les deux

lois de Coulomb, qui expriment incomplètement une équivalence entre une quantité purement mécanique d'une part, une force, et une quantité électrique ou magnétique d'autre part, il faudra laisser deux facteurs indéterminés qui, d'ailleurs, sont liés l'un à l'autre, comme le montre l'équivalence des aimants et des solénoïdes, par la condition

$$\frac{m}{t} l^2 = \mu l \qquad \text{ou} \qquad mv = \mu.$$

Ces lois devront s'écrire

$$f = \frac{kmm'}{r^2} v^2, \qquad f = \frac{k\mu\mu'}{r^2};$$

m, m' sont des quantités d'électricité, μ, μ' des quantités de magnétisme, séparées par une distance r, et exerçant l'une sur l'autre une force f; v est ce « rapport des unités » qui est égal à la vitesse de la lumière dans le vide; k est enfin le facteur qui, pour l'une et l'autre des actions, dépend de la nature du milieu d'une manière encore inconnue, et sur les dimensions duquel nous ne pouvons encore faire que des hypothèses.

Ces hypothèses, quelque arbitraires qu'elles doivent être, nous ne pouvons les éviter dès que nous faisons des expériences de mesures; car il y a trop d'avantages évidents à ce que tous les physiciens et industriels adoptent une convention commune, même arbitraire, qui donne une signification connue de tous aux nombres qu'on publie. D'ailleurs, le choix est naturellement limité à deux conventions universellement employées, qui conduisent l'une ($k = v^{-2}$) au système d'unités dit *électrostatique*, l'autre ($k = 1$) au système *électromagnétique*, le plus important dans l'industrie. Ni l'une, ni l'autre ne sont probablement exactes; elles n'ont aucune valeur en Physique générale, ce sont seulement des conventions qui mettent l'accord dans le langage, et c'est déjà beaucoup.

Faut-il s'arrêter là? Doit-on se contenter d'avoir traduit en équations une partie des lois des phénomènes électriques et

borner là sa curiosité? Je ne le crois pas; je pense, avec bon nombre de physiciens, que le désir de *comprendre* est légitime et fructueux, et c'est à Sir W. Thomson que j'emprunterai la définition de ce mot.

« Il me semble que le vrai sens de la question « Comprenons-nous ou ne comprenons-nous pas un sujet particulier en Physique? » est « Pouvons-nous faire un modèle mécanique correspondant? » J'ai une extrême admiration pour le modèle mécanique de l'induction électromagnétique, dû à Maxwell; il a créé un modèle capable d'exécuter toutes les opérations merveilleuses que l'électricité fait dans les courants induits, etc., et il ne peut être douteux qu'un modèle mécanique de ce genre est extrêmement instructif et marque un pas vers une théorie mécanique de l'électromagnétisme. » (*Molec. Dyn.*, p. 132.)

« Je ne suis jamais satisfait, tant que je n'ai pas pu faire un modèle mécanique de l'objet; si je puis faire un modèle mécanique, je comprends; tant que je ne puis pas faire un modèle mécanique, je ne comprends pas, et c'est pour cela que je ne comprends pas *la* théorie électromagnétique de la lumière. Je crois fermement en *une* théorie électromagnétique de la lumière; quand nous comprendrons l'électricité, le magnétisme et la lumière, nous les verrons comme des parties d'un tout; mais je demande à comprendre la lumière le mieux possible sans introduire des choses que je comprends encore moins. Voilà pourquoi je m'adresse à la Dynamique pure. » (*Molec. Dyn.*, p. 270.)

Il résultait de considérations en partie hypothétiques développées par Maxwell en 1865 qu'une force électromotrice et une force magnétique périodiques doivent se propager comme la lumière, la force magnétique étant constamment perpendiculaire à la force électromotrice. On sait avec quel éclat les parties principales de ces prévisions ont été confirmées par les expériences de M. Hertz. L'identité de la chaleur rayonnante et de la lumière, la conversion de la chaleur en travail mécanique d'une part, l'explication si complète que fournissent les théories mécaniques des phénomènes lumineux d'autre part ne laissent guère place au doute sur la

nature mécanique de ceux-ci. Il est donc vraisemblable que l'une des deux quantités force magnétique ou force électromotrice est identique à l'une des quantités, déplacement, rotation, force élastique, ou force motrice, etc., qui définissent mécaniquement le même phénomène lumineux. On obtient ainsi le Tableau de dimensions de la page suivante pour la quantité de magnétisme et la quantité d'électricité.

Parmi ces formules, on ne doit mettre à part, pour entreprendre la discussion, que celles qui satisfont à la condition évidente que voici. Aux dimensions de la quantité d'électricité, et à celles du potentiel électrostatique, on doit pouvoir faire correspondre une propriété mécanique indépendante de toute idée de direction. Au contraire, la force électrostatique, le potentiel vecteur électromagnétique, la force magnétique, le moment magnétique entraînent l'idée de direction. Je ne dis rien de la masse magnétique qui ne correspond pas à un fait physique simple; on ne peut la définir que comme extrémité d'un sélénoïde, et dans le cas des courants variables il est au moins douteux que cette extrémité puisse être considérée isolément.

Les systèmes qui satisfont à ces conditions ont été imprimés en caractères gras. On voit qu'ils ne comprennent pas les systèmes — en italiques — dont on se sert le plus habituellement quand on cherche à mettre en relief l'analogie, souvent utile, quoique imparfaite, entre les propriétés du champ magnétique, et les propriétés d'un corps solide élastique en comparant à un déplacement ou à une déviation angulaire, soit le potentiel vecteur, soit la force magnétique.

Restent trois systèmes :

I. La masse électrique est une masse mécanique.

La force électrostatique est une accélération.

Le potentiel électrostatique est une énergie par unité de masse.

Le potentiel vecteur est une vitesse linéaire.

La force magnétique est une vitesse angulaire ou une vitesse de déformation.

Nature de la force électrostatique.	Force électrostatique $kv^2 r^{-2} m = F m^{-1}$.	Quantité d'électricité m.	Potentiel électrostatique $F m^{-1} r$.	Moment magnétique $(mv) l$.	Force magnétique $F (mv)^{-1}$.	Potentiel vecteur électromagnétique $F l (mv)^{-1}$.
Angle Dilatation linéaire ou cubique ; glissement	o	MLT^{-2}	L	ML^3T^{-3}	$L^{-1}T$	T
Vitesse angulaire Vitesse de dilatation ou de glissement.	T^{-1}	MLT^{-1}	LT^{-1}	ML^3T^{-2}	L^{-1}	$L^{-1}T$
Accélération angulaire, etc.	T^{-2}	ML	LT^{-2}	ML^3T^{-1}	$L^{-1}T^{-1}$	T^{-1}
Déplacement linéaire	L	MT^{-2}	L^2	ML^2T^{-3}	T	LT
Vitesse	*LT^{-1}*	*MT^{-1}*	*L^2T^{-1}*	*ML^2T^{-2}*	*O*	*L*
I. Accélération	**LT^{-2}**	**M**	**L^2T^{-2}**	**ML^2T^{-1}**	**T^{-1}**	**LT^{-1}**
Quantité de mouvement	MLT^{-1}	T^{-1}	ML^2T^{-1}	L^2T^{-2}	M	ML
Moment d'une quantité de mouvement.	ML^2T^{-1}	$L^{-1}T$	ML^3T^{-1}	LT^{-2}	ML	ML^2
II. Force	**MLT^{-2}**	**0**	**ML^2T^{-2}**	**L^2T^{-1}**	**MT^{-1}**	**MLT^{-1}**
Couple	ML^2T^{-2}	L^{-1}	ML^3T^{-2}	LT^{-1}	MLT^{-1}	ML^2T^{-1}
III. Force par unité de volume.	**$ML^{-2}T^{-2}$**	**L^3**	**$ML^{-1}T^{-2}$**	**L^5T^{-1}**	**$ML^{-3}T^{-1}$**	**$ML^{-2}T^{-1}$**
Force élastique par unité de surface. Couple par unité de volume	$ML^{-1}T^{-2}$	L^2	MT^{-2}	L^4T^{-1}	$ML^{-2}T^{-1}$	$ML^{-1}T^{-1}$
Force par unité de longueur (tension superficielle) (dérivée d'une force suivant sa direction) Couple par unité de surface	MT^{-2}	L	MLT^{-2}	L^3T^{-1}	$ML^{-1}T^{-1}$	MT^{-1}
Inverse d'un déplacement linéaire Déplacement par unité de surface	L^{-1}	$ML^{-1}T^{-2}$	o	MLT^{-3}	$L^{-2}T$	$L^{-1}T$
Débit par unité de surface	*$ML^{-1}T^{-1}$*	*L^2T^{-1}*	*MT^{-1}*	*L^4T^{-2}*	*L*	*L^2*

Le moment magnétique est le moment d'une quantité de mouvement.

C'est la comparaison la plus répandue; consciemment ou non, nous subissons la tyrannie de l'hypothèse des fluides; aucune expérience n'a jamais mis en évidence une masse mécanique de l'électricité, et le transport des propriétés électriques par le courant, sans densité électrique interne, paraît difficilement conciliable avec l'idée fondamentale qui conduit à ces dimensions.

L'identité des équations de l'induction dans des corps en repos avec les équations du mouvement des fluides visqueux a été souvent utilisée comme image du champ magnétique. Helmholtz, en particulier [*Abhandlungen* (*Electrodynamik*), p. 577], montre que la vitesse du gaz correspond au potentiel vecteur, son excès de pression au potentiel électrostatique, et les coefficients de frottement à la résistance spécifique; la forme particulière de la théorie de Maxwell est obtenue quand le gaz devient incompressible.

II. La masse électrique n'a pas de dimensions; c'est, par exemple, une *dilatation ou une condensation cubique;* ou un *angle de rotation fini.*

La force électrostatique est une force.

Le potentiel électrostatique est une quantité d'énergie.

Le potentiel vecteur est une quantité de mouvement.

La force magnétique est le produit d'une masse par une vitesse angulaire ou par une vitesse de dilatation, et le moment magnétique est le produit d'une surface par une vitesse angulaire, ou par une vitesse de dilatation.

L'ensemble de ces analogies peut être développé sous forme de théorie élastique en partie satisfaisante. On remarquera de quelle manière naturelle le signe de la masse électrique s'introduirait ici.

III. La masse électrique est un volume.

La force électrostatique est une force par unité de volume.

Le potentiel électrostatique est une quantité d'énergie par unité de volume.

Le potentiel vecteur est une quantité de mouvement par unité de volume.

La force magnétique est le moment d'une quantité de mouvement par unité de volume.

Ces trois systèmes de dimensions ne sont peut-être pas les seuls qu'on puisse imaginer conformément aux idées générales que j'ai indiquées. Celui qui me paraît préférable, au moyen duquel l'interprétation mécanique à peu près complète me paraît le plus facile, est le second. J'essayerai de le montrer ailleurs.

Tous trois ont ceci de commun, que les dimensions de la quantité d'électricité y sont indépendantes du temps, et par là sont bien d'accord avec l'idée qu'on se fait généralement des phénomènes électrostatiques qu'on regarde comme des phénomènes d'*équilibre*.

Or il n'est personne qui ne sache quel trouble apportent à toutes les expériences d'électrostatique les imperfections de l'isolement. Il n'y a pas de comparaison possible entre la durée d'un état d'équilibre électrique et la durée de l'équilibre mécanique d'un ensemble de solides; quelques heures d'un côté, des siècles de l'autre. Ne serait-il pas plus satisfaisant de considérer les phénomènes électrostatiques comme des phénomènes de mouvement vibratoire permanent, dont la dissipation peut être seulement beaucoup ralentie, mais jamais évitée complètement? Pour le faire concevoir par un exemple, adoptons pour un moment l'hypothèse optique de l'éther, dans lequel la propagation des ondes longitudinales est extrêmement lente, les petites variations périodiques de densité ne mettant en action que des forces élastiques du second ordre de petitesse, dans les milieux transparents. Toute vibration d'une molécule matérielle donnera naissance à des ondes transversales, qui se propagent avec la rapidité que l'on sait sous forme de lumière ou chaleur rayonnante et à des variations périodiques de densité dans leur voisinage. Ces variations resteront absolument confinées autour de la molécule, ou se propageront, mais sans vitesse définie, plus ou moins vite, suivant l'importance des forces élastiques du

deuxième ordre qu'elles font naître. Sans entreprendre de développer ici ce point de vue, dont la fécondité est évidente, contentons-nous de remarquer qu'un état vibratoire au sein d'un milieu incapable de le propager se révélera à nos sens par des propriétés moyennes identiques à celles d'un état d'équilibre. Toute cette analogie reste en dehors de l'application faite par Maxwell des théories mécaniques générales aux phénomènes électrodynamiques. A ce point de vue, l'absence de toute idée de direction dans les notions expérimentales de quantité d'électricité et de potentiel électrostatique ne suffit plus à nous faire rejeter aucun des systèmes du Tableau, puisqu'il ne s'agit plus que de notions moyennes, et le Tableau lui-même ne saurait être considéré comme complet.

Répétons, pour conclure, que les systèmes d'unités dits *électromagnétique* et *électrostatique* ont un intérêt industriel incontestable; mais, en admettant que les phénomènes électriques soient de nature purement mécanique, — ce que nous ignorons, — les lois actuellement connues ne suffisent pas à déterminer, même en s'aidant de quelques idées générales, la nature mécanique des quantités électriques et magnétiques; il manque au moins une loi expérimentale pour cela.

NOTE II.

DYNAMIQUE MOLÉCULAIRE.

VINGT CONFÉRENCES FAITES A L'UNIVERSITÉ DE JOHN HOPKINS
(octobre 1884), (autographié);

PAR

SIR W. THOMSON.

ANALYSE ET EXTRAITS,

PAR

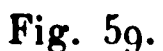
M. BRILLOUIN.

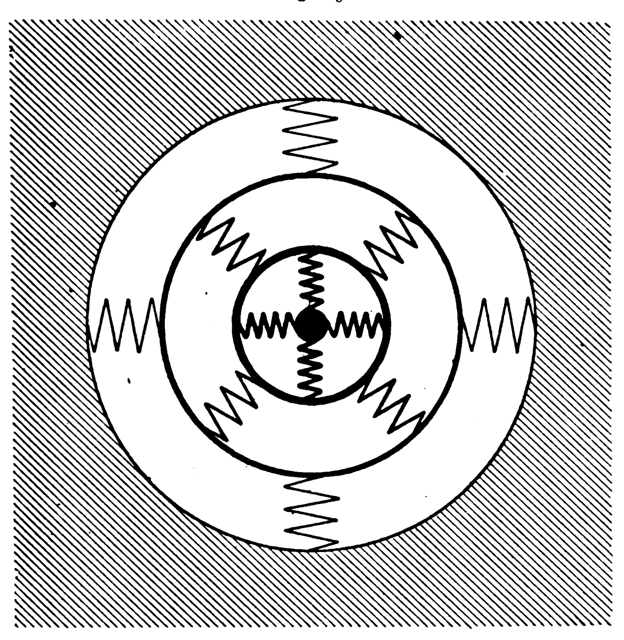
Dans ces conférences, Sir W. Thomson insiste sur les difficultés qui subsistent dans les théories générales de l'Optique : conditions de continuité à la surface de deux corps transparents et théorie de la réflexion; théorie de la double réfraction, rôle de la pression, introduction de termes qui semblent dépendre des rotations internes. Tout intéressante que soit cette discussion, elle est incomplète, et le lecteur curieux de l'approfondir trouvera les détails nécessaires dans l'excellent Rapport de M. Glazebrook sur les théories optiques (*British Assoc. Adv. Sc.*, 1886), dans le cours d'Optique et dans les leçons sur l'Électricité de M. Poincaré, et dans toute la série des Mémoires anglais parus à la suite de ces conférences de Sir W. Thomson et des Notes ultérieures dans lesquelles il les a modifiées ou complétées. Reste la théorie de la dispersion. Cette théorie de la dispersion, entrevue par Sir W. Thomson en 1882 et développée par lui en 1884, est, avec plus de précision, celle de M. Boussinesq (1867), déjà conçue, paraît-il, et exposée de vive voix bien antérieurement par Stokes, et reprise sous diverses formes par les auteurs qui se sont occupés de la dispersion anomale, découverte par Christiansen en 1870.

Dans les corps ordinaires, il faut tenir compte des mouvements de l'éther et de l'entraînement simultané des atomes matériels qui constituent le corps chimique. Ces atomes groupés forment une molécule, qui dans les solides a une position moyenne déterminée, vers laquelle elle est rappelée par les actions des autres molécules et par les réactions de l'éther qui la baigne. Il en est de même des atomes constitutifs de la molécule, qui sont très énergiquement rappelés vers leur position d'équilibre dans la molécule, et qui eux aussi réagissent sur l'éther. Ainsi le milieu se compose de l'éther, que nous pouvons traiter comme isotrope, homogène et continu pour toutes les longueurs d'onde lumineuses ou ultra-violettes connues, puisque le vide n'est pas dispersif, et des molécules matérielles *dispersives*. Ces molécules, formées d'un nombre limité d'atomes, sont des systèmes mécaniques dont le nombre de déformations indépendantes est limité, qui conduisent par conséquent à un nombre limité d'équations de mouvement, et ont un nombre limité de périodes vibratoires propres. Il suffit de savoir cela pour pouvoir en tirer, soit par l'Analyse mathématique, soit par l'Analyse expérimentale, une série de résultats généraux importants, en imaginant un modèle mécanique qui obéisse aux équations générales de la Mécanique pour le nombre de déformations indépendantes adopté, sans d'ailleurs attribuer à ce modèle aucune autre analogie de détail avec la molécule dispersive dont il fait connaître les lois de mouvement. Supposant d'abord, pour simplifier, que les réactions entre l'éther et la molécule matérielle dépendent exclusivement du déplacement relatif de l'éther et d'un seul des atomes constituants de la molécule, Sir W. Thomson imagine alors la molécule dispersive comme formée par une enveloppe sphérique polie ([1]), enfermant une série de sphères concentriques séparées les unes des autres par des ressorts de flexion dont

([1]) Il y a évidemment là un point faible, d'autant plus que, pour des raisons de stabilité, Sir W. Thomson pense que la sphère extérieure doit avoir la plus petite masse. Mais il ne s'agit que d'indications d'une théorie qui serre évidemment la réalité de plus près que les autres, sans l'étreindre encore complètement. (M. B.)

la distribution est *isotrope* (*fig.* 59). Ces ressorts et les communications avec l'éther sont supposés absolument dépourvus de frottement; Sir W. Thomson s'élève, avec raison selon moi, contre toute introduction, dans les équations élémentaires, de ces termes de frottement qui entraînent une dissipation d'énergie, et il rejette formellement la tentative théorique d'Helmholtz. Pour l'étude expérimentale des propriétés de la molé-


Fig. 59.



cule dispersive, il est plus commode de réaliser un appareil formé de poids différents reliés par des ressorts de flexion inégaux, ou un appareil de torsion comme celui de la page 103, dans lequel les différents leviers sont inégalement chargés. On reconnaît alors, sous une forme à peine différente, les propriétés décrites dans la conférence sur la grandeur des atomes, (p. 120-124 et 133-136).

La molécule dispersive est caractérisée par un certain

nombre de périodes vibratoires propres; lorsque le mouvement de l'éther a une période peu supérieure à l'une des périodes propres de la molécule, celle-ci s'ébranle très facilement, le rapport de l'amplitude de son mouvement à l'amplitude du mouvement de l'éther devient grand (*Conf.*, p. 134). Si comme tout porte à le croire, la densité de la matière qui la forme est plusieurs millions de fois la densité de l'éther ([1]),

---

([1]) Sir W. Thomson, *Sur la densité de l'éther* (*Comptes rendus*, 1854). (*Math. Phys. Papers*, T. II., art. LXVII, p. 28). — Les observations de Herschel, de Pouillet, puis de MM. Violle, Crova, Langley conduisent au résultat suivant. Une surface d'un centimètre carré, exposée normalement au rayonnement solaire, à la limite extérieure de l'atmosphère, reçoit environ trois calories-grammes par minute, un vingtième de calorie, un peu plus de deux kilogrammètres, par seconde. Cette quantité d'énergie, qui a mis une seconde à atteindre la surface absorbante, occupait au commencement de la seconde le cylindre d'un centimètre carré de base et d'une hauteur égale au parcours de la lumière en une seconde dans le sens du rayon, c'est-à-dire un volume de 3.10^{10} centimètres cubes. Cette énergie vibratoire est moitié potentielle et moitié cinétique, et comme dans ce mouvement vibratoire — à moins que la polarisation ne soit partout circulaire, — la vitesse n'est certainement pas constamment égale à sa valeur supérieure v_0, la force vive est certainement inférieure au produit de la masse par la moitié du carré de la vitesse maximum v_0; elle se réduirait à moitié de cette valeur si la polarisation était partout rectiligne, ce qui est l'autre cas extrême. On a donc, en appelant ρ la densité mécanique de l'éther par rapport à l'eau,

$$\frac{\rho}{2} v_0^2 = \frac{\rho V^2}{2} \left(\frac{v_0}{V}\right)^2 = 0{,}07 \text{ C.G.S.},$$

car l'énergie de deux kilogrammètres, dans 3.10^{10} centimètres cubes, donne 0,07 *ergs* par centimètre cube; de là on tire

$$\rho = 1{,}3 \times 10^{-22} \left(\frac{V}{v_0}\right)^2.$$

Nous ne connaissons pas, il est vrai, le rapport $\frac{V}{v_0}$; mais l'uniformité de la vitesse de propagation de la lumière, quelle que soit l'intensité, nous indique que l'amplitude est certainement petite par rapport à la longueur d'onde ou, ce qui revient au même, que la vitesse maximum v_0 n'est qu'une petite fraction de la vitesse de propagation V_0, et si l'on admet successivement les valeurs un centième, un millième, un dix-millième pour le rapport $\frac{v_0}{V}$, on trouve pour ρ : $1{,}3 \times 10^{-18}$, $1{,}3 \times 10^{-16}$, $1{,}3 \times 10^{-14}$. On peut donc admettre que la densité de l'éther n'est pas moindre que 10^{-20} de celle de l'eau, et peut atteindre 10^{-15} ou un peu plus. (M. B.)

on voit que, même en attribuant à chaque molécule un très petit volume, la force vive de l'ensemble des molécules est de même ordre de grandeur que celle de l'éther qui les baigne. Cela équivaut à une augmentation d'inertie, variable avec la période, et change en conséquence la vitesse de propagation.

Si la période du mouvement incident est inférieure à la plus courte période propre, le mouvement ne se propage pas : il reste confiné à la surface du corps et y produit la fluorescence ou la phosphorescence (*Conf.*, p. 133). Au voisinage des autres périodes, la dispersion anomale est intense, et l'absorption aussi.

« Je suis confus d'avouer, dit Sir W. Thomson (*Molec. Dyn.*, p. 120), que je n'avais jamais entendu parler de la dispersion anomale jusqu'au moment où je l'ai aperçue dans ces formules; et j'appris alors qu'on l'avait observée depuis huit ou dix ans. »

La formule de dispersion en question est (*Molec. Dyn.*, p. 148)

$$n^2 = 1 - \frac{c_1}{\rho} T^2 \left(1 + \frac{q_1 T^2}{\tau_1^2 - T^2} + q_2 \frac{T^2}{\tau_2^2 - T^2} + q_3 \frac{T^2}{\tau_3^2 - T^2} + \ldots\right),$$

dans laquelle n est l'indice de réfraction pour la lumière de période T; τ_1, τ_2, τ_3 sont les périodes propres de la molécule par ordre de grandeurs décroissantes; ρ la densité de l'éther; c_1 le coefficient d'élasticité mutuelle entre l'éther et la molécule, et q_1, q_2, ... des nombres dont l'ordre de grandeur dépend des relations entre les masses des enveloppes sphériques et les ressorts qui les maintiennent. Cette formule indique un indice imaginaire pour les très longues périodes, si $1 - q_1 - q_2 - \ldots$ est positif; un indice nul et croissant à partir d'une certaine période, d'abord plus petit que l'unité, puis de plus en plus grand à mesure que la période se rapproche de la plus longue des périodes propres τ_1; si $1 - q_1 - q_2 - \ldots$ est négatif, l'indice commence par être très grand, décroît, passe par un minimum puis recommence à croître. L'indice devient imaginaire pur pour les périodes plus courtes que τ_1, jusqu'à une certaine valeur pour laquelle il redevient nul, et croît indéfiniment, etc. Les valeurs imaginaires pures de l'in-

dice correspondent à un mouvement vibratoire qui ne se propage pas du tout, et décroît en progression géométrique avec la profondeur, sans aucun changement de phase. C'est une bande d'absorption, extrêmement étroite si q_1 est très petit, étalée et large, au contraire, si q_1 est grand, limitée assez nettement du côté du rouge, diffuse du côté du violet. D'ailleurs, sous une incidence oblique, la lumière ne commence pas à pénétrer aussitôt que l'indice redevient réel ($>$ o); elle est réfléchie totalement jusqu'à ce que l'indice se rapproche assez de l'unité, et donne d'abord dans un prisme une déviation vers le sommet de l'angle [1], l'ordre des couleurs depuis le sommet vers la base étant le même que dans le spectre ordinaire. Plusieurs couleurs donnent la même déviation.

Si la molécule dispersive n'est pas isotrope, soit par la distribution de la masse, soit par celle des ressorts, le milieu peut être biréfringent. Si les ressorts sont enroulés en hélice, dans le même sens, une flexion est accompagnée d'une torsion, et inversement, une rotation de l'enveloppe sphérique externe entraînée par l'éther adhérent est accompagnée d'une flexion; des vibrations circulaires, droite et gauche ne produisent pas les mêmes déformations de la molécule et se propagent différemment.

Il va sans dire que l'élasticité due aux ressorts peut être remplacée par une élasticité apparente due à des rotations internes, entièrement ou partiellement compensées, comme dans la molécule gyrostatique (*Conf.*, p. 155-156). Sir W. Thomson se trouve conduit à une loi de rotation du plan de polarisation en raison inverse du carré de la période [2].

---

[1] Tels sont les résultats généraux de la théorie de Sir W. Thomson, avec d'intéressantes conséquences pour la théorie de la réflexion métallique. Je n'en dirai rien, parce qu'il me paraît que les conditions à la surface doivent être modifiées quand on tient compte des deux milieux mêlés, éther et matière ordinaire. (M. B.)

[2] La théorie ainsi ébauchée ne fournit pas d'indications sur la distance des molécules, mais elle ne peut manquer d'en donner dans l'avenir : elle établit, en effet, une relation entre les phénomènes de réfraction et d'absorption et les périodes propres de la molécule. Pour tous les corps simples, ces périodes propres sont déterminées pour la molécule libre par l'analyse spectrale, et ne peuvent pas être notablement modifiées dans l'état solide ou liquide (à moins que la



molécule elle-même ne soit modifiée), car les actions mutuelles des molécules, prises en bloc, sont incomparablement plus faibles que les actions atomiques dans l'intérieur d'une molécule, comme le montre suffisamment la lenteur de la propagation des déformations élastiques. La spectrophotométrie permettra tôt ou tard la détermination d'une fonction des masses et des élasticités atomiques autre que celle que déterminent les périodes.

La définition mécanique de la molécule serait ainsi complète, si l'on pouvait admettre, comme Sir W. Thomson, et, je crois, tous les auteurs, que chaque période observée correspond à un mouvement indépendant possible. Cette idée est, à mon avis, tout à fait fausse; le nombre des mouvements internes indépendants n'est pas égal à celui des raies du spectre d'un corps, mais seulement à celui des groupes de raies dont l'aspect varie simultanément. La multiplicité des raies d'un même groupe tient à ce que l'énorme amplitude des vibrations de la molécule devenue lumineuse lui fait dépasser de beaucoup les limites pour lesquelles les actions mutuelles sont proportionnelles aux déplacements, et l'étude des périodes et des intensités relatives, dans un groupe, donnera la loi d'action en fonction du déplacement, ainsi que le genre de conditions initiales dues à l'excitation par l'étincelle électrique ou par la combustion d'un sel dans diverses circonstances. C'est cette loi d'action, non linéaire, mais sensiblement la même pour un grand nombre de corps, comme le montre la similitude de groupes de raies nombreuses, qu'il faut actuellement rechercher.

Dans le corps traversé par la lumière, on peut se contenter des actions linéaires si le corps est transparent, les vibrations restant très petites; mais si le corps est fortement absorbant, les actions linéaires sont insuffisantes; le phénomène consiste, en effet, en ce que le corps s'échauffe sous l'action de la lumière, c'est-à-dire que les radiations de période relativement courte excitent non seulement des vibrations de même période, mais encore et surtout des vibrations de période différente et plus longue, lesquelles se dissipent par rayonnement. Il y a dissipation de l'énergie lumineuse; c'est un fait dont divers auteurs, Helmholtz en particulier, tiennent grossièrement compte par l'introduction d'un terme de frottement proportionnel à la vitesse dans les équations du mouvement moléculaire; dont Sir W. Thomson propose de tenir compte par des chocs des molécules les unes contre les autres, ce qui revient à l'introduction d'actions non linéaires entre les molécules considérées comme un tout; dont, à mon avis, il faut tenir compte surtout par des actions non linéaires intérieures à la molécule. De toute façon, les équations de Sir W. Thomson sont incomplètes au voisinage des bandes d'absorption, précisément parce qu'elles ne tiennent pas compte de cette transformation de l'énergie à courte période, en énergie vibratoire à longue période. De là l'intérêt qui s'attacherait à une étude approfondie des conditions de l'absorption et de la réfraction d'une part dans les vapeurs, dans les solutions étendues, où ces propriétés sont moléculaires; d'autre part dans les solides ou les liquides concentrés; car la comparaison permettrait de faire la part des actions élastiques et des actions atomiques.

(M. B.)

NOTE III.

CONSTITUTION MOLÉCULAIRE DE LA MATIÈRE

(*Proc. Roy. Soc. Ed.*, 1889);

PAR

SIR W. THOMSON.

ANALYSE ET EXTRAITS,

PAR

M. BRILLOUIN.

« 1. C'est l'opinion pratiquement unanime du monde scientifique que toute la matière tangible ou palpable, la matière massive (*molar*) comme nous pourrions l'appeler, est formée de groupes de molécules ou d'atomes agissant les uns sur les autres. Avec une telle constitution, la matière n'est plus essentiellement homogène; l'homogénéité apparente ne peut plus être qu'une homogénéité de l'assemblage. « Un corps » est dit homogène lorsque aucune différence de qualité ne » permet de distinguer deux portions égales et semblables » quelconques dont les lignes correspondantes sont parallèles et de même sens ([1]). »

» J'ajoute que cette définition est essentiellement celle d'un édifice cristallin, à moins que la portion considérée du corps ne contienne un nombre extraordinairement grand de molécules. Il est, en effet, bien difficile d'imaginer un équilibre statique ou cinétique dans une collection irrégulièrement distribuée de molécules. Une telle collection peut être un liquide; j'ai peine à voir comment elle peut être un solide. Il semble donc qu'un solide homogène isotrope n'est qu'un assemblage isotrope de cristaux maclés, c'est-à-dire un solide

([1]) THOMSON ET TAIT, *Traité de Philosophie naturelle*, Part II, § 675.

composé de morceaux cristallisés dont les axes sont distribués uniformément dans toutes les directions. L'isotropie, pratiquement si parfaite, des objectifs vitreux des grandes lunettes astronomiques et des bons prismes de verre, semble démontrer que la structure moléculaire dernière est assez serrée pour permettre l'existence de portions cristallisées homogènes contenant un très grand nombre de molécules, bien que leur étendue dans l'espace ne soit qu'une très petite fraction de la longueur d'onde de la lumière (1). ».

3-13. *Partage périodique de l'espace.* — Diverses formes des polyèdres élémentaires.

14-28. *La théorie de Boscovich* (1763). *Équilibre.* — « Sans accepter la thèse fondamentale que les derniers atomes de matière sont des points doués de masse, et s'attirant ou se repoussant en fonction de la distance, et que toutes les propriétés de la matière sont dues à l'équilibre ou aux mouvements de ces points, on peut néanmoins pénétrer plus avant dans la connaissance de la structure moléculaire réelle de la matière et de ses propriétés thermodynamiques par la considération des problèmes statiques et cinétiques que cette théorie suggère (ex : Cristallographie de Hooke, ou de Haüy; théorie élastique de Navier, Poisson, etc.; théorie cinétique des gaz : Clausius, Maxwell, Tait, etc.). »

Configurations d'équilibre *stable* de 2, 3, 4 atomes qui s'attirent suivant la loi de Newton à grande distance, et se repoussent énergiquement à petite distance (3, triangle équilatéral, 4, tétraèdre équilatéral; toutes les autres configurations d'équilibre sont instables).

---

(1) Une pareille constitution maclée des corps qui nous paraissent isotropes est évidemment moins stable que la pure constitution cristalline; une petite déformation de l'ensemble peut entraîner des déformations assez grandes de certains des cristaux maclés, des glissements, des changements dans les enchevêtrements, en résumé des déformations non réversibles. Cela paraît tout à fait conforme à l'idée, émise par Maxwell, que les phénomènes résiduels tant en élasticité qu'en électricité et magnétisme sont dus à ce que certaines configurations internes se détruisent pendant l'accroissement des forces, pour se reformer autrement pendant la diminution. (M. B.)

Équilibre d'un assemblage homogène, illimité, formé soit de points isolés, soit de groupes de points convenables.

29-44. *Mouvements et chocs.* — Lorsque plus de deux atomes se choquent à la fois (pénètrent dans la sphère de répulsion l'un de l'autre), ils se séparent, en général, lorsque leurs vitesses sont considérables, et s'il se forme des groupes de deux, trois, ils ne tardent pas à être détruits par les chocs qu'ils subissent; tel est le cas d'un gaz monoatomique, à une température très supérieure au point critique (§ 34).

Mais, si les vitesses initiales des atomes sont faibles, chaque rencontre de deux ou plusieurs atomes aura généralement pour effet de produire une petite inégalité dans la distribution initiale de l'énergie des atomes, et, par conséquent, de rejeter une partie d'entre eux avec une vitesse supérieure à leur vitesse initiale, et, en revanche, de laisser les autres réunis en un groupe polyatomique, doué d'une énergie assez grande, soit potentielle, soit cinétique de translation d'ensemble, soit de circulation ou de vibrations internes. Les rencontres de ce groupe avec des atomes simples, en mouvement lent, diminueront en général l'énergie du groupe, et rapprocheront son état de l'état d'équilibre, puis lui permettront de s'accroître par adjonction de nouveaux atomes. Un tel groupe d'atomes (un petit cristal), entouré d'atomes simples en mouvement rapide (vapeur) peut donc être en voie d'accroissement ou de diminution suivant qu'il reçoit ou cède de l'énergie par les atomes qui constituent la paroi du vase. S'il reçoit de l'énergie, le groupe peut entrer en vibrations d'amplitude assez grande pour qu'une partie des atomes cesse d'avoir une position d'équilibre définie et commence à circuler au milieu des autres sans pourtant s'en écarter (liquéfaction). Il peut aussi passer d'une configuration d'équilibre stable à une autre (action de la température ou de la pression sur la forme cristalline du chlorate de potasse).

45. Résumé de la doctrine de Bravais.

46-61. Assemblage homogène le plus dense de sphères ou

d'ellipsoïdes semblables, macle artificielle du spath d'Islande (voir Sir W. Thomson *C. R. Ac. Sc.* 2e sem., 1889).

Arrivons à l'objet principal du Mémoire :

28. La relation d'égalité entre les deux coefficients d'élasticité des corps isotropes et les relations analogues pour les cristaux ne sont des conséquences de la théorie de Boscovich que pour les assemblages de points simples; on retrouve toute la généralité de la théorie de l'élasticité déduite des seules conditions de symétrie (21 coefficients de Green), avec des assemblages homogènes de groupes de deux atomes au moins.

61-65. On peut constituer un solide élastiquement isotrope, au moyen d'un assemblage équilatéral de points simples, en assujettissant la loi d'action à une certaine restriction (cet assemblage est soumis à la restriction de Poisson).

66-71. *Réalisation d'un solide incompressible.* — Matérialisons les actions de Boscovich, en construisant un tétraèdre avec quatre boules, réunies deux à deux par six tiges articulées, inflexibles, mais douées d'élasticité longitudinale (comme les pesons, dans lesquels un ressort à boudin est attaché à deux tubes qui peuvent coulisser librement l'un dans l'autre, mais sans tourner ni fléchir); puis plaçons au centre du tétraèdre une autre boule munie de quatre tiges rigides, mais articulées, aboutissant aux quatre sommets du tétraèdre. Celui-ci sera devenu incompressible.

Imaginons maintenant deux assemblages tétraédriques homogènes, placés de telle sorte que les sommets de l'un soient au centre des tétraèdres de l'autre; supposons qu'à une distance égale au côté du tétraèdre il y ait attraction faible; à une distance un peu plus grande, attraction négligeable; enfin, à la distance d'un centre à un sommet, une répulsion énergique; le solide ainsi construit est élastiquement isotrope, déformable facilement, et pourtant presque incompressible.

Le corps ainsi constitué a encore une texture cristalline, et si l'isotropie d'élasticité est réalisée, il ne semble pas certain qu'il en soit de même pour les autres propriétés. Dans cet article, Sir W. Thomson n'in-

dique pas l'exemple qui serait décisif, celui d'un corps possédant les 21 coefficients d'élasticité. Il ne semble pas qu'il y ait rien à objecter à la démonstration, telle qu'on la trouve dans la *Théorie mathématique de la Lumière* de M. Poincaré, p. 18-20, ou dans sa *Théorie de l'Élasticité,* p. 47-50. Quand les forces intérieures entre deux points, dirigées suivant la droite qui les joint, ne dépendent que de la distance de ces deux points, et quand les forces extérieures sont nulles, il n'y a que 15 coefficients distincts. On retrouve les 21 coefficients, sans forces extérieures, 1° si les forces intérieures ne sont pas centrales, en particulier si l'action de deux atomes n'est pas dirigée suivant la droite de jonction; 2° si, dirigée suivant cette droite, elle dépend non seulement de la distance de ces deux atomes, mais encore de celle des atomes voisins. Même les plus fervents adeptes de la pure hypothèse de Boscovich peuvent et doivent admettre qu'il en est ainsi pour les actions moyennes seules accessibles à l'observation, surtout pour les actions entre atomes d'une même molécule. Il n'est, en effet, pas douteux que les atomes oscillent autour d'une position moyenne, avec une amplitude sensible par rapport aux distances atomiques, et il faudrait des lois d'action mutuelle très particulières pour qu'on soit en droit d'exprimer l'effet résultant d'actions purement centrales à chaque instant, au moyen d'une force moyenne dirigée de la position moyenne de l'un des atomes vers la position moyenne de l'autre, et fonction seulement de la distance de ces positions moyennes.

Il paraît donc intéressant de décrire le modèle de corps à 21 coefficients décrit par Sir W. Thomson dans ses *Leçons de Dynamique moléculaire,* en 1884 (p. 127 et suiv.).

Considérons une distribution parallélépipédique; supposons que les actions mutuelles ne s'exercent qu'entre molécules immédiatement voisines, et voyons de combien de ressorts distincts nous pouvons disposer pour relier les sommets de l'un des parallélépipèdes, en tenant compte de l'homogénéité :

1° Des ressorts sur les 12 côtés, égaux 4 à 4, ce qui fait **3** groupes distincts de ressorts (dilatation linéaire des côtés);

2° Des ressorts sur les 12 diagonales des faces, les ressorts parallèles étant égaux : **6** groupes (changement d'angle des faces);

3° Des ressorts indépendants suivant les **4** diagonales du parallélépipède (changement des angles solides).

Au total **13** ressorts, plus les rapports de deux des côtés au troisième, cela nous fait bien les **15** données de construction

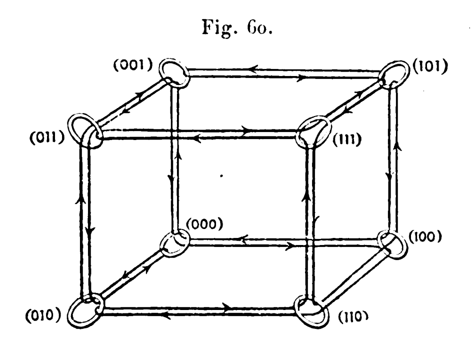
indépendantes, de la théorie de Navier et de Poisson. Il est facile de voir que l'isotropie réduit les coefficients à un seul; ce qui manque, c'est d'être maître de la compressibilité cubique (p. 130) : « J'avoue que cela m'a paru très difficile, jusqu'à ce que j'aie songé à enrouler une corde deux fois autour des 12 côtés du parallélépipède. Ici, vous voyez le problème résolu au moyen de ces cordes qui courent le long des côtés du parallélépipède en passant à travers un anneau à chacun des 8 sommets (montrant un modèle). Cela ne peut être fait symétriquement; c'est une vérité mathématique, du moins je le suppose. Suivons la corde, nous allons voir comment on peut le faire; je vais le retrouver moi-même. Voici l'ordre des sommets, désignés par leurs coordonnées, en suivant la corde (¹) :

(000) (001) (011) (010) (000) (010) (011) (001) (000) (100) (110) (010)
(110) (111) (011) (111) (101) (001) (101) (111) (110) (100) (101) (100)

« Il y a bien d'autres manières de le faire, c'en est une;

(¹) J'ai modifié l'ordre indiqué par Thomson en permutant le 2ᵉ et le 4ᵉ sommet, pour que la corde suive chaque côté en sens opposé à ses deux trajets. Dans l'ordre primitif, la face (000) (001) (011) (010) était parcourue deux fois dans le même sens; c'est le diagramme ainsi corrigé que représente la *fig.* 60.

Fig. 60.



Voici une autre disposition plus symétrique, qui assure également bien l'incompressibilité, dans l'ensemble des parallélépipèdes contigus, au moyen de deux

nous avons fait passer la corde trois fois par chaque sommet, c'est tout ce qu'il faut.

» Voulons-nous assurer l'incompressibilité, prenons une corde inextensible. Mais, dira-t-on, vous n'avez réussi qu'en employant un corps flexible; quoique cette objection me touche peu, puisqu'il s'agit seulement d'un modèle mécanique, je puis la lever, et n'employer que des corps rigides; à chaque sommet fixons trois *renvois de sonnette*, et relions-les par des fils inextensibles, la même condition est satisfaite. La condition d'invariabilité de la somme des côtés à partir de la forme parallélépipède rectangle équivaut à l'invariabilité du volume pour les petites déformations.

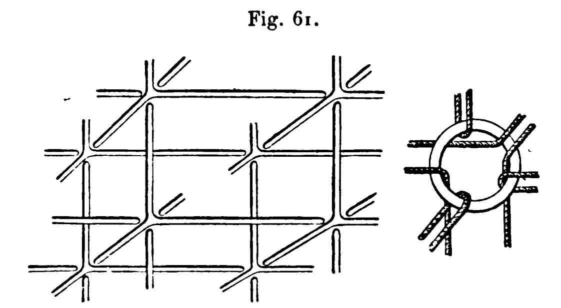
» Prenons des fils extensibles au lieu de fils rigides pour relier les renvois de sonnette, et choisissons des élasticités différentes pour les trois directions des côtés; cela fait 3 nouvelles données indépendantes. Lorsque le corps est en équi-

---

cordes seulement sur chaque côté, tandis que, dans la disposition de Sir W. Thomson, chaque côté dans l'assemblage serait parcouru par 4 cordes (*fig.* 61).

(000) (100) (000) (010) (000) (001) (000),

Fig. 61.



A chaque sommet toutes les cordes traversent un anneau, comme cela est indiqué à droite.

ou la disposition symétrique

(111) (011) (111) (101) (111) (110) (111).

On pourrait de même assurer séparément l'invariabilité de l'aire d'une face ou d'un plan diagonal quelconque. (M. B.)

libre, il n'y a aucune traction sur les fils; mais tous entrent en action dans la déformation la plus générale, et il y a en tout **18** données indépendantes quand on rapporte la déformation aux côtés du parallélépipède comme axes de coordonnées, et **21** quand les axes de coordonnées sont arbitraires. »

On reconnaît facilement dans la corde de Sir W. Thomson, les actions mutuelles de deux points modifiées par la présence des points voisins; et dans les doubles fils avec renvois de sonnette, associés aux ressorts, des actions mutuelles plus compliquées encore, puisqu'elles dépendent des points voisins, et qu'en outre elles ne sont pas dirigées suivant la droite de jonction des deux atomes, se composant d'une force et d'un couple. Cet exemple même paraît donc une excellente illustration de la proposition classique. C'est seulement quand on renonce aux pures actions de Boscovich qu'on peut continuer comme Sir W. Thomson :

« Remarquons maintenant que Navier et Poisson nous donnent le moyen de faire un renvoi de sonnette, bien qu'ils ne nous donnent pas le moyen de faire une gelée (incompressible). Ils nous donnent le moyen de faire un ressort élastique en zigzag. Prenons donc des solides qui satisfont à leur théorie et fabriquons-en des renvois de sonnette et des ressorts; associons-les, prenons-les assez petits et assez nombreux et nous aurons un solide homogène, formé de parties qui satisfont aux restrictions de Poisson et de Navier, mais qui dans son ensemble en est débarrassé. »

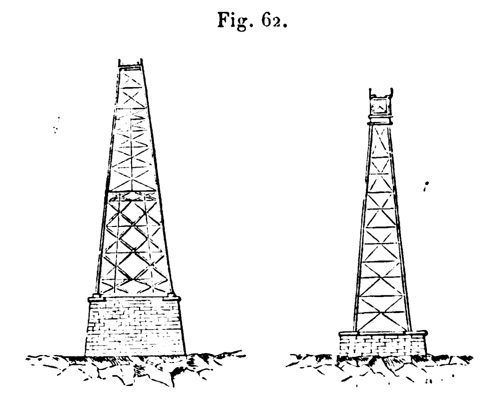
Cette manière d'envisager le solide comme composé de molécules dont chacune a déjà une structure très compliquée, conduit, ailleurs, Sir W. Thomson à des aperçus curieux sur les constructions en fer de nos ingénieurs considérées comme éléments de solide (*Molec. Dyn.*, p. 214).

« Une texture hétérotrope du genre de celle d'un tissu, d'une toile métallique, présente à mon avis un grand intérêt dans la Mécanique appliquée. La théorie de cette hétérotropie [1]

[1] Hétérotrope, œolotrope, anisotrope, par opposition à isotrope, se dit d'une structure dont les propriétés ne sont pas les mêmes dans toutes les directions autour d'un point.

dans les solides continus nous conduit à des idées importantes pour les constructions. En fait, toutes les constructions en fer, poutres, piliers, etc. sont telles que des milliers ajustées côte à côte, comme les briques d'un édifice, constitueraient un solide œolotrope. Nos questions un peu abstraites d'œolotropie sont intimement liées à d'importantes questions pratiques sur le genre de déformation qu'un corps subit sous l'influence de forces déterminées. Soit, par exemple, une tour construite en treillis à diagonale, comme le phare électrique qui éclaire la passe de Hell-Gate dans la baie de New-York. Si un poids un peu lourd est placé à son sommet, elle nous montrera le genre d'œolotropie latérale quant à la rigidité, qui est développé dans un fil par une torsion permanente dépassant la limite d'élasticité. En général, les entretoises indépendantes d'une tour sont toutes placées symétriquement (*fig.* 62), en sorte que rien de semblable ne devrait se

Fig. 62.



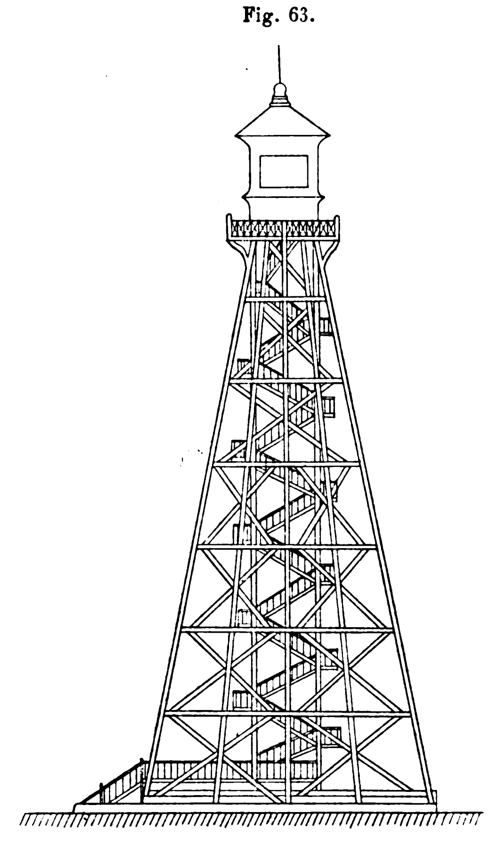
Piles de pont, ayant deux plans de symétrie verticaux rectangulaires.

produire; mais, dans une tour dont les entretoises sont dissymétriques, toutes les diagonales courant dans le même sens, nous trouverons cette œolotropie. Je me borne à mentionner cela comme un exemple un peu grossier, mais pour vous montrer que la théorie des solides élastiques continus est

intimement liée à des questions très importantes pour l'art de l'ingénieur. »

Le genre de dissymétrie hélicoïde indiqué plus haut, droit ou gauche, suivant le sens des diagonales qui manquent, est presque toujours pro-

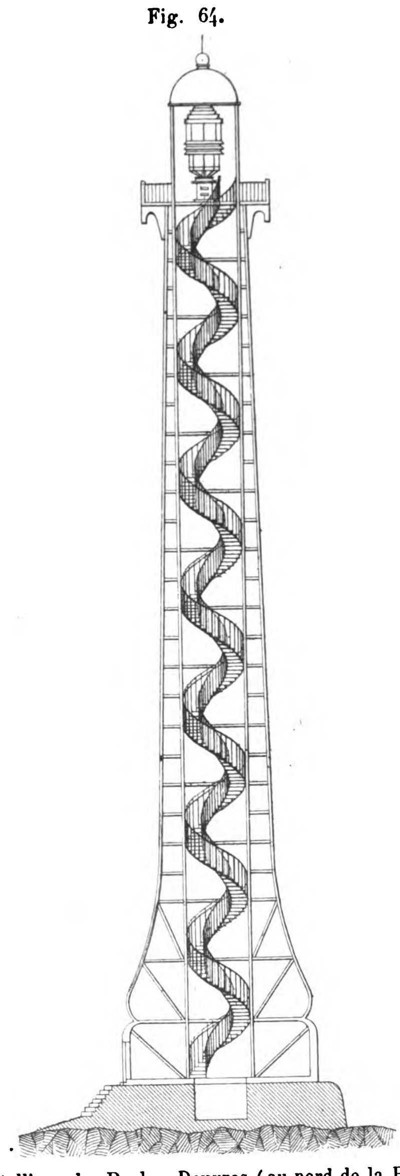
Fig. 63.



Phare en charpente de Pontaillac (près de l'embouchure de la Gironde).
Disposition hélicoïde de l'escalier, non isotrope autour de l'axe vertical. Paliers et rampes alternants.

duit par l'escalier dans les phares de peu d'importance, même construits symétriquement (*fig.* 63, 64); dans un escalier en spirale dont les

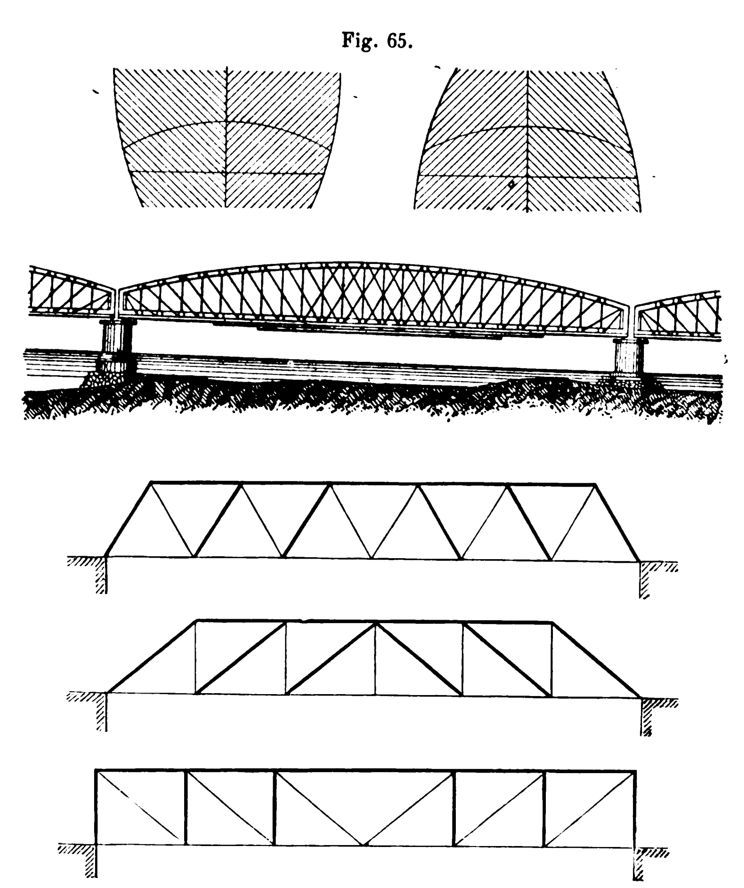
Fig. 64.



Phare métallique des Roches-Douvres (au nord de la Bretagne).
Symétrie hélicoïde parfaite.

marches sont rivées autour d'un tube continu, un poids placé sur les marches produit une compression, une flexion et une torsion, car les deux premières déformations sont accompagnées forcément de la troi-

Fig. 65.



Ponts à diagonales symétriques et poutres prises dans un cristal de gypse maclé.

sième. Dans beaucoup de poutres de ponts, la distribution des entretoises diagonales est symétrique par rapport au milieu du pont (*fig*. 65, 66, 67): la poutre est alors analogue à celle qu'on taillerait perpendiculairement au plan de macle dans un cristal maclé, tel que du gypse fer de lance (*fig*. 65, en haut), en donnant d'ailleurs une forme symétrique quel-

conque aux deux moitiés de la poutre, et la faisant reposer soit sur une face, soit sur l'autre.

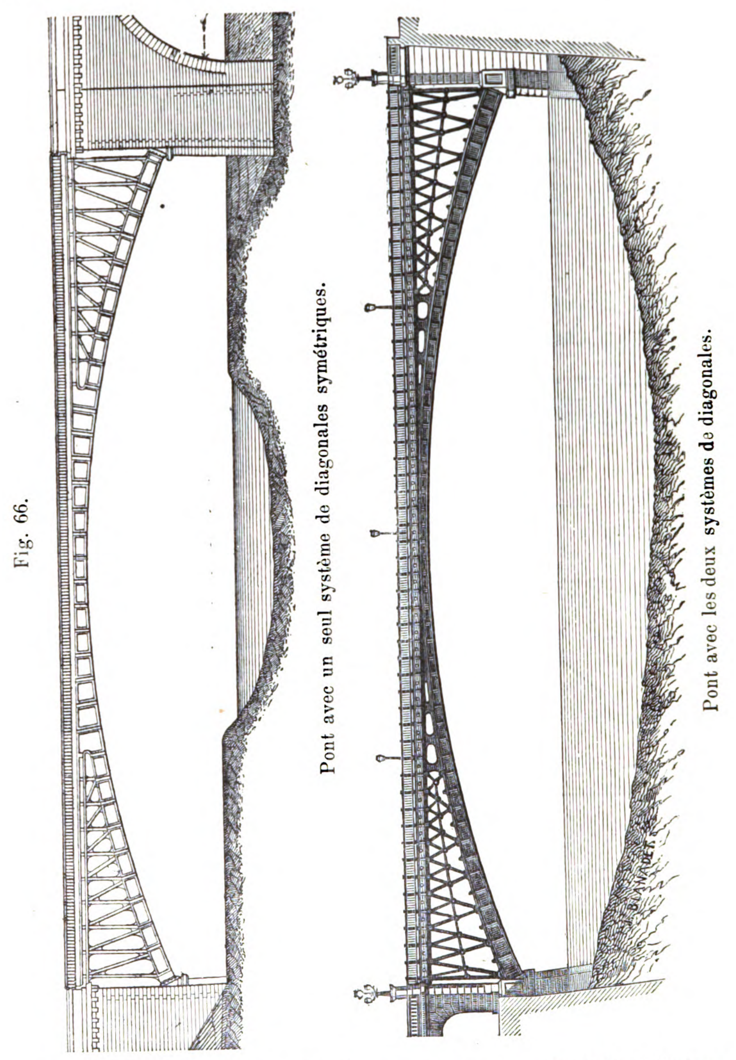


Fig. 66.

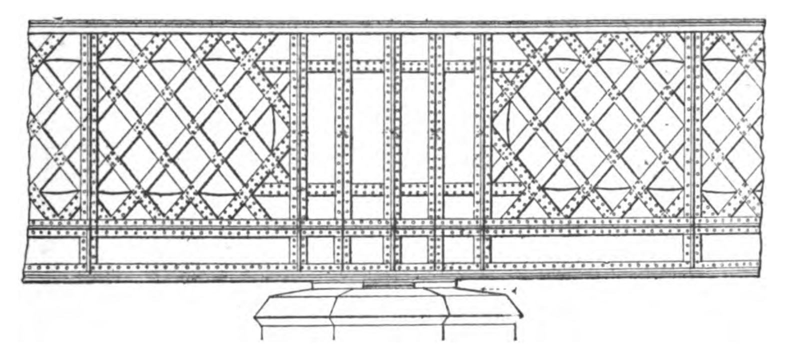
Pont avec un seul système de diagonales symétriques.

Pont avec les deux systèmes de diagonales.

Cette conception de Sir W. Thomson a aussi un intérêt théorique. L'élément de construction en fer rivé qu'il propose comme *molécule*

intégrante du corps œolotrope a ceci de particulier, qu'il peut être extrêmement résistant aux déformations simples, dilatations et glissements. Les équations ordinaires pour de tels solides s'appliqueraient encore pour des volumes contenant plusieurs millions de molécules; mais à mesure que le volume élémentaire, qu'il est permis de traiter comme uniformément déformé, comprendrait moins de molécules intégrantes, par exemple dans la propagation de vibrations dont la longueur d'onde ne comprendrait que dix molécules intégrantes, on devrait mettre de plus en plus en évidence les propriétés particulières de ces molécules,

Fig. 67.



qui sont de résister beaucoup moins aux déformations du second ordre, *flexions et torsions,* avec ou sans symétrie, qu'aux déformations du premier ordre, *compressions et glissements,* lorsque les liaisons des molécules les unes aux autres sont des articulations placées aux angles. La déformation serait donc commandée par les couples proportionnels au volume, et non par les forces; ce seraient les équations des couples élémentaires qui régiraient l'équilibre et le mouvement, et les équations des forces deviendraient négligeables. En particulier, les conditions de continuité à la surface de séparation de deux milieux en seraient totalement changées. Sans le développer davantage ici, ce point de vue, dont Sir W. Thomson n'a rien dit, m'a paru mériter d'être signalé.

NOTE IV.

REPRÉSENTATIONS MÉCANIQUES DU CHAMP MAGNÉTIQUE.

MOUVEMENT D'UN LIQUIDE VISQUEUX. — ÉQUILIBRE OU MOUVEMENT D'UN SOLIDE ÉLASTIQUE. — ÉQUILIBRE OU MOUVEMENT D'UNE SUBSTANCE IDÉALE APPELÉE POUR ABRÉGER « ÉTHER ». — REPRÉSENTATION MÉCANIQUE DE LA FORCE MAGNÉTIQUE (mai 1890)

(*Math. and phys. Papers*, t. III, art. XCIX, p. 436);

PAR

SIR W. THOMSON.

ANALYSE ET EXTRAITS,

PAR

M. BRILLOUIN.

Après avoir rappelé les équations connues relatives aux liquides visqueux (**1-11**) et aux solides élastiques (**12-13**), Sir W. Thomson arrive à l'*éther gyrostatique* (*voir* p. 153). Il le définit comme un corps continu, qui résiste infiniment aux causes de changement de volume; qui résiste, mais en leur obéissant, aux couples qui tendent à le faire tourner; qui cède sans aucune résistance à toute déformation sans rotation. Un solide élastique incompressible (gelée) résiste au contraire aux déformations que n'accompagne aucune rotation, tandis qu'il cède aux couples sans résistance. Si l'on désigne par u, v, w les déplacements d'un point, les forces gyrostatiques X, Y, Z, qui agissent sur les faces normales à x, y, z, sont données (coord. orthog.) par le Tableau suivant

	X.	Y.	Z.
Face normale à Ox...	$-p$	$n\left(\frac{\partial v}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial y}\right)$	$n\left(\frac{\partial w}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial z}\right)$
» Oy...	$n\left(\frac{\partial u}{\partial y}-\frac{\partial v}{\partial x}\right)$	$-p$	$n\left(\frac{\partial w}{\partial y}-\frac{\partial v}{\partial z}\right)$
» Oz...	$n\left(\frac{\partial u}{\partial z}-\frac{\partial w}{\partial x}\right)$	$n\left(\frac{\partial v}{\partial z}-\frac{\partial w}{\partial y}\right)$	$-p$

Les équations du mouvement de translation d'un élément de volume soumis à l'action de forces X, Y, Z par unité de masse sont, comme pour une gelée,

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0,$$

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = n \Delta u - \frac{\partial p}{\partial x} + X.$$

La propagation des ondes transversales s'y fait donc comme dans une gelée élastique.

A la surface de séparation de deux milieux, *dont la rigidité n est la même,* mais qui diffèrent seulement de densité, les conditions de continuité des forces sont les mêmes pour une gelée et pour l'éther de Sir W. Thomson; la pression p, le déplacement u, v, w et les neuf dérivées premières de u, v, w par rapport à x, y, z sont continus; *quand les rigidités sont différentes,* les dérivées du déplacement tangentiel prises dans le sens de la normale sont différentes de part et d'autre; la pression est continue pour l'éther, discontinue pour la gelée ([1]).

L'énergie, par unité de volume, due à une déformation donnée n'a pas la même expression pour l'éther et pour la gelée incompressible. La valeur *totale* est la même lorsque le volume est limité par des parois fixes; mais la répartition est différente; d'ailleurs les réactions du milieu sur les parois ne sont pas les mêmes. Considérons, par exemple (§ 26), une déformation cylindrique, dans laquelle la partie intérieure à un cylindre de rayon a a tourné comme un solide invariable de l'angle θ, et la partie extérieure a cédé, sans rotation élémentaire, par des déplacements circulaires $\frac{\theta a^2}{r}$ en raison

---

([1]) Sont continus à travers une face normale à Ox : u, v, w; par conséquent $\frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z}$; $\frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial z}$; $\frac{\partial w}{\partial y}, \frac{\partial w}{\partial z}$; et $\frac{\partial u}{\partial x}$ à cause de l'incompressibilité.

Forces	Gelée........	$-p + 2n\frac{\partial u}{\partial x}$,	$n\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)$,	$n\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)$,
	Ether........	$-p$,	$n\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right)$,	$n\left(\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z}\right)$.

inverse de la distance à l'axe. Pour la *gelée*, l'énergie totale $2n\pi\theta^2a^2$ est tout entière extérieure au cylindre a et répartie comme l'énergie électromagnétique d'un courant électrique constant d'intensité $\frac{1}{2}a^2\theta$ dans le cylindre central; le déplacement représente la force magnétique. Pour l'*éther gyrostatique,* la même énergie totale est tout entière confinée dans le cylindre central et répartie comme l'énergie électromagnétique du champ produit par un solénoïde indéfini enroulé sur ce cylindre de rayon a, dont la densité de courant par unité de longueur de génératrice est $\frac{\theta}{2\pi}$; la rotation représente la force magnétique ([1]).

29-43. *Représentation mécanique de la force magnétique dans un électro-aimant.* — Sir W. Thomson revient à la comparaison indiquée pour la première fois en 1847 ([2]), dans

([1]) Dans cette déformation, les déplacements sont continus à travers la surface du cylindre de rayon a, mais les composantes tangentielles des forces appliquées à la surface du cylindre, perpendiculairement aux génératrices, n'ont pas même valeur de part et d'autre de cette surface. Il faut donc imaginer, appliquées à cette surface, des forces tangentielles $2n\theta a^2$ par unité de surface, produisant un couple $2\pi n\theta a^3$, dans le sens de la rotation θ, par unité de longueur du cylindre (par exemple, en imaginant un cylindre de toile métallique, immergé dans la gelée, et auquel ce couple serait appliqué). Ce couple est directement équilibré par la rotation du cylindre interne dans le cas de l'éther gyrostatique; mais, dans le cas de la gelée, ce couple est intégralement transmis à l'extérieur et doit être équilibré par des forces tangentielles de direction contraire appliquées à très grande distance du cylindre; forces qu'on peut réduire par unité de surface, sans changer la valeur totale du couple pour une ligne fermée quelconque entourant le cylindre central. Le couple appliqué au cylindre a, par unité de longueur, représente la force électrostatique qu'une force électromotrice externe doit maintenir pour l'équilibre dans le cas de la gelée; c'est la force par unité de surface de ce cylindre qui joue ce même rôle dans le cas de l'éther gyrostatique.

Au lieu de chercher à développer parallèlement les deux analogies, en prenant le déplacement dans un cas, la rotation dans l'autre, pour représenter l'induction magnétique, Sir W. Thomson s'attache à montrer, dans les paragraphes et les articles suivants, qu'en représentant dans les deux cas l'induction magnétique par la rotation, l'éther gelée n'est pas satisfaisant et qu'au contraire l'éther gyrostatique donne une représentation fidèle des faits. (M. B.)

([2]) Sir W. THOMSON, ***Sur une représentation mécanique des forces électriques, magnétiques et galvaniques.*** (***Camb. Dubl. Math. Journ.***, 1847; ***Math. and Phys. Papers***, t. I, p. 76-80.)

laquelle la force électromagnétique est toujours représentée par la rotation $w'_y - v'_z, \ldots$, la densité du courant par la convexité qu'acquiert un plan primitivement normal au courant (somme des inverses des rayons de courbure de cette surface, ou Δu, Δv, Δw), et le potentiel vecteur par le déplacement (u, v, w). Il montre que cette représentation est satisfaisante pour l'éther gyrostatique, mais non pour la gelée.

Pour un courant linéaire, en forme de corde sans fin, quel que soit l'enchevêtrement du nœud (non serré) qu'elle forme, cette déformation est obtenue en appliquant de l'extérieur à la corde une force tangente, constante par unité de longueur; chacune des composantes du déplacement u, v, w peut se calculer comme le potentiel d'une distribution de masses agissant suivant la loi de Newton, avec une densité mesurée par la composante correspondante X ou Y ou Z de la force extérieure, divisée par $2\pi n$. Plus généralement, supposons que l'on applique dans tout le milieu des forces X, Y, Z rapportées à l'unité de volume, et telles que l'on puisse diviser tout le volume en tubes sans fin, tangents à la force sur toute leur longueur, et dont la section droite soit inversement proportionnelle à la force [1]; les déplacements u, v, w sont les potentiels d'une distribution

$$\frac{X}{4\pi n}, \quad \frac{Y}{4\pi n}, \quad \frac{Z}{4\pi n},$$

obéissant à la loi de Newton, quelle que soit la compressibilité cubique du milieu, et ce déplacement correspond exactement au potentiel vecteur électromagnétique de courants d'intensité X, Y, Z, dans un milieu de perméabilité magnétique n, si la rotation ($w'_y - v'_z, \ldots$) correspond à l'induction magnétique.

« 44. Nous sommes maintenant arrivés au bout des développements que dans mon court article d'il y a 43 ans, « je » réservais pour une publication ultérieure ». Tout, dans ces

(1) $\frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} + \frac{\partial Z}{\partial z} = 0.$



développements, s'applique indifféremment à notre substance idéale appelée *éther*, et à un solide élastique incompressible ordinaire, *gelée*. Pourquoi donc n'être pas satisfait du solide ordinaire pour la représentation mécanique? L'action particulière sur les lignes de force magnétique, due à l'aimantation induite, n'était pas visée dans mon article de 1847. On aurait pu croire à la possibilité de comprendre ces effets dans la même analogie en donnant des rigidités différentes à la gelée dans ses différentes régions, pour correspondre à ses différentes perméabilités magnétiques ([1]). Il n'en est pas ainsi, et ce sont les étonnantes conditions nécessaires pour comprendre l'aimantation induite dans la représentation mécanique qui m'ont conduit à recourir à cette force *quasi élastique* qui dépend de la rotation absolue et nullement de la déformation, et, par suite, à imaginer cette nouvelle substance idéale que j'ai appelée *éther*. Les conditions de continuité à la surface de deux substances de perméabilités magnétiques différentes, placées dans un champ magnétique, sont que les composantes normales de l'*induction magnétique* ([2]) soient égales de part et d'autre de la surface, mais que les composantes tangentielles de cette même *induction magnétique* soient dans le même rapport que les perméabilités correspondantes. L'*induction magnétique* étant dans notre analogie la rotation de la gelée ou de l'éther, les expressions des forces élastiques données ci-dessus montrent que cette condition est satisfaite pour l'éther, mais ne l'est pas pour la gelée.

» 45. Avec notre nouvelle représentation mécanique, l'énorme accroissement d'énergie qu'acquiert un électro-aimant rectiligne par la présence d'un noyau de fer doux devient facilement intelligible. Dans la région occupée par le fer doux,

---

([1]) Rapport de l'intensité d'aimantation à la force magnétique qui la produit. *Voir* JOUBERT, *Electr. et Magn.*, § 628; p. 217-220.

([2]) *L'induction magnétique* (Maxwell) est la force qui agit sur l'unité de masse magnétique placée dans une cavité en forme de disque très mince et très large dont le plan est perpendiculaire aux lignes d'aimantation. Sir W. Thomson l'avait appelée « définition électromagnétique de la force magnétique »

(M. B.)

il faut supposer que l'éther a une rigidité incomparablement moindre que l'éther du reste de l'espace, cuivre ou air. Dans le cas où le cuivre parcouru par le courant forme une mince couche cylindrique de rayon moyen a, sans fer doux, le problème mécanique analogue a été complètement traité (p. 326). S'il y a un noyau de fer doux de perméabilité égale à 300, il faut supposer que la valeur de la rigidité n de l'éther n'est dans cette région que $\frac{1}{300}$ de ce qu'elle est au dehors, et conserver la même grandeur des forces extérieures. Remarquons que dans le cylindre et dans l'espace qui l'entoure extérieurement, à des distances de l'axe petites par rapport aux distances des extrémités, l'équilibre de l'éther dépend uniquement d'une équivalence entre la somme des couples opposés à la rotation, dus à l'éther intérieur au cylindre, et celle des couples entraînants dus à la bobine, sans aucune rotation, sans aucune contribution à la rotation de la part de l'éther extérieur, excepté près des extrémités. Ainsi, dans ce cas, la rotation et, par suite, l'énergie de l'éther intérieur à la bobine sera 300 fois ce qu'elle était dans le premier cas, sauf près des bouts. Dans le voisinage des extrémités, il faudrait traiter le très difficile problème attaqué par Green, et résolu dans le cas de l'induction magnétique, avec un défaut avoué de rigueur, au § **17** de son Essai, désormais célèbre, sur l'application de l'Analyse mathématique aux Théories de l'Électricité et du Magnétisme.

» Opposons aux propriétés de *l'éther* celles de la *gelée*. Comme il n'y a pas de *déformation* [1] (sauf près des bouts) dans l'intérieur du cylindre, la plus ou moins grande rigidité de la gelée ne change rien du tout. En fait, on pourrait ôter la gelée de l'intérieur, et n'y laisser qu'un trou. Le mouvement sans rotation dans la gelée extérieure (sauf près des bouts) serait le même que si tout l'espace était rempli d'une matière homogène. C'est hors du cylindre, comme on l'a déjà dit, qu'est le siège de l'énergie. L'équilibre de la gelée dans ces circonstances résulte de la compensation des forces appliquées dans la membrane cylindrique par des forces dues à

[1] Puisque, éther ou gelée, l'intérieur du cylindre a tourné comme un solide invariable. (M. B.)

la résistance élastique à la déformation dans la gelée extérieure [1], avec un déplacement sans rotation dans les régions qui entourent le milieu de la longueur du cylindre, et des déplacements avec rotation correspondant aux lignes de force magnétique près des bouts.

» **46.** Il est à peine nécessaire de dire que l'éther que nous avons imaginé est une substance idéale. Il me paraît pourtant extrêmement probable que la relation entre les forces et la rotation absolue est, en tous cas, conforme à la vérité pour l'éther véritable. Même dans la simple supposition du § **14**, à laquelle nous avons été conduit par la seule considération de la perméabilité magnétique, nous avons adopté une propriété qui mène directement à l'explication proposée par Stokes comme théorie de l'aberration de la lumière [2], à savoir que la Terre et les autres corps célestes ne communiquent à l'éther que des déplacements sans rotation en le traversant. C'est le cas, en fait, pour les mouvements très lents de corps durs polis, ou de solides plastiques, occupant des cavités vésiculaires dans notre éther imaginaire. En général, soit que notre éther s'étende indéfiniment en tous sens, avec des cavités vésiculaires ou tubulaires, ou qu'il soit limité par une paroi de forme quelconque *n'exerçant qu'une pression normale*, le mouvement qu'il prend pour un mouvement donné de la paroi est précisément le même que prendrait sous la même influence un liquide incompressible sans frottement. J'ai à peine besoin de rappeler aux personnes au courant de l'hydrocinétique que la vitesse d'une partie quelconque de la substance est toujours celle qui pour une vitesse normale donnée de la paroi possède l'énergie cinétique minimum [3].

» **47.** Jusqu'ici notre représentation est purement statique. On obtient une extension cinétique évidente au moyen des équations du mouvement, pour tout cas où les forces sont

---

(1) *Voir* la note, p. 327.

(2) STOKES, *Math. and Phys. Pap.*, t. I, p. 124, 153, 156.

(3) THOMSON et TAIT, *Nat. Ph.*, t. I, § 317, Ex. 3.

appliquées à une portion limitée de la gelée ou de l'éther, et sont des fonctions périodiques du temps. Nous obtenons tout simplement ainsi la *théorie ondulatoire de la lumière;* c'est un résultat inévitable, si nous traitons comme réel ce déplacement d'un solide élastique, par lequel, dans mon ancien Mémoire, je donnais seulement une *représentation* des courants électriques et des forces magnétiques correspondantes. Mais, pour donner quelque chose qui soit une réalisation matérielle de la théorie électromagnétique de la lumière de Maxwell, il faudrait montrer la *force électrostatique* en relation avec les forces X, Y, Z de mes formules; il faudrait expliquer la production de chaleur suivant la loi de Joule, en vertu de l'action de ces forces, lorsqu'elles produisent l'écoulement du courant électrique à travers un conducteur; il faudrait montrer comment il se fait que la vitesse de la lumière dans l'éther, égale ou plutôt *est* le nombre d'unités électrostatiques dans l'unité électromagnétique de quantité d'électricité. Tout cela comprend la considération de la matière pondérable qui est traversée par l'éther, ou qui y est encastrée, et d'un *tertium quid,* que nous pouvons appeler *électricité,* un fluide qui pénètre partout, et qui sert à transmettre la force entre la matière pondérable et l'éther et à produire par son écoulement les mouvements moléculaires de la matière pondérable appelés *chaleur*.

» Je ne vois aucun moyen de proposer des propriétés de la matière, de l'électricité ou de l'éther, par lesquelles tout cela puisse être fait, si ce n'est très grossièrement, et je pense que nous devons sentir à présent que la triple association, éther, électricité et matière pondérable n'est point une réalité de la nature, mais plutôt un résultat de notre défaut de connaissance et de notre impuissance à rien imaginer au delà de l'horizon actuel limité de la science physique. »

Dans la conférence *Éther, Électricité et Matière pondérable,* se trouve un paragraphe consacré à cette triple association, qu'il me paraît à propos de joindre au présent article. (*Math. and Phys. Papers,* t. III, p. 502, § 18) :

« Considérons un corps solide élastique de densité extrême-

ment faible, et supposons qu'une partie du solide, en forme de tube, soit poreuse, mais de même rigidité d'ensemble que la partie continue qui l'entoure. Un fluide *visqueux* dense est mis en circulation à travers les pores qu'il remplit, au moyen d'un piston ou de tout autre mécanisme. La poussée du fluide sur le corps poreux produira un déplacement rotatoire statique autour d'axes tangents à des circonférences ayant leur centre sur l'axe du tube, la rotation étant exactement distribuée comme la force magnétique autour d'un courant électrique. Quelques-uns des problèmes pratiques les plus intéressants d'induction électromagnétique peuvent être réalisés au moyen de modèles mécaniques, en poursuivant cette idée. En fait, s'il n'y avait que l'éther et l'électricité, ce serait complet; s'il n'y avait pas la matière pondérable, dont il faut bien tenir compte, je me trouverais complètement satisfait, quant au problème de l'induction magnétique, en regardant l'électricité comme un fluide visqueux et l'éther comme un solide élastique poreux par places, mais continu, ou non poreux ailleurs. »

NOTE V.

ÉTHER, ÉLECTRICITÉ ET MATIÈRE PONDÉRABLE.

EXTRAIT DE L'ALLOCUTION PRÉSIDENTIELLE
A L'INSTITUTION DES INGÉNIEURS ÉLECTRICIENS (10 janvier 1889)
(*Math. and Phys. Pap.*, t. III, § CII, p. 484-516);

PAR

SIR W. THOMSON.

—

EXTRAIT,

PAR

M. BRILLOUIN.

Les premiers paragraphes de ce très intéressant discours sont consacrés à diverses questions d'électricité pratique, télégraphie par câbles, téléphonie, distribution des courants alternatifs à la surface des conducteurs, et analogie de la diffusion du courant alternatif avec la diffusion du mouvement dans un fluide visqueux ou de la chaleur dans un corps conducteur.

« **19.** Imaginons qu'un courant continu parcoure une hélice ordinaire, ou un solénoïde muni d'un noyau de cuivre solide. Quelle que soit la nature du courant électrique, je crois qu'il produit *réellement* l'effet suivant : *il pousse* l'éther *en rond* à l'intérieur du solénoïde; je ne crois pas que ce soit une illusion des théories électromagnétiques; quelque difficile qu'elle soit, je crois que cette idée est exacte. D'une manière ou d'une autre, le courant électrique à travers le fil communique un mouvement tournant à l'éther dans notre noyau de cuivre et dans l'air intermédiaire.

Quelle que soit la nature de l'éther, nous passons à travers, la Terre y passe aussi. Les astronomes, les opticiens ne se désespèrent pas, ne rendent pas leur vie misérable, à

cause de l'aberration de la lumière; Fresnel et le professeur Stokes ont fait tout ce que l'homme a été capable de faire, jusqu'au 9 janvier 1889, comme explication dynamique de l'aberration de la lumière. Elle n'est probablement pas hors de portée de l'esprit humain la solution complète de cette question : comment se fait-il que la Terre circule à travers cet éther solide élastique et que pourtant les ondes de lumière se propagent comme elles font? L'aberration de la lumière est encore un mystère complet; mais tous ceux qui s'occupent d'Optique et d'Astronomie ne passent pas leur vie dans l'angoisse parce qu'ils ont toujours cette difficulté sous les yeux. Et nous, devons-nous être accablés de soucis parce que, quand nous voyons un fil mobile entraîné par la force électromagnétique, en vertu du courant qui le traverse, nous ne voyons pas comment un milieu, s'il est capable de tension magnétique, peut laisser le fil se mouvoir? Après tout, si mystérieux que cela soit, il y a un mystère plus grand encore. Un acte de libre volonté est, avec les lois connues de la matière, un mystère bien plus profond que tout ce qu'on a jamais pu imaginer ou rêver dans la dynamique de l'éther, de l'électromagnétisme et de la lumière.

D'une manière ou d'une autre, quelle qu'elle soit, l'éther est *poussé en rond* et produit un mouvement tournant dans l'intérieur du solénoïde.

» 20. Arrivons au cas du fer. Que produit un courant constant passant à travers l'hélice? De deux choses l'une : ou bien le courant constant entraîne indéfiniment l'éther dans son mouvement, ou bien il le fait tourner d'un certain angle proportionnel à l'intensité du courant et l'amène à un état d'équilibre statique. Il fait l'une ou l'autre de ces deux choses. En quoi le fer peut-il différer du cuivre quant aux conditions à la surface? Notre condition superficielle dépendant de viscosités égales est très claire; mais, en introduisant du fer, ce que nous introduisons, c'est une condition qui dépend de la rotation, sans rien qui puisse être cause d'un frottement ou d'une action élastique. Une action élastique, — en écartant la compression ou la raréfaction qui n'ont rien à voir avec le

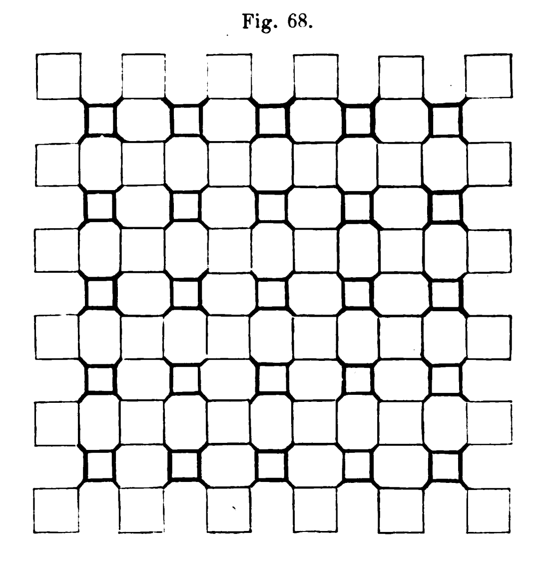
sujet actuel, — exige une déformation. Sans déformation, on ne met en jeu aucune élasticité d'un solide élastique incompressible. Si l'application de forces tangentielles sur toute la paroi d'un cylindre fait tourner la circonférence, nous en faisons aussi tourner le contenu ; à la fin, tout le fluide intérieur tournera avec la même vitesse angulaire que la paroi cylindrique. Ainsi notre fluide visqueux de comparaison se comporte très bien, pour la force magnétique à l'intérieur d'un solénoïde qui ne contient pas de matière magnétique, et met bien en évidence le fait que tout se passe de même, que la matière soit conductrice ou non. Mais, avec le fer, c'est tout autre chose. Il faut que notre fluide visqueux de comparaison nous fournisse une plus grande vitesse de rotation permanente, ou un plus grand déplacement angulaire statique, dans l'espace occupé par le fer que dans l'espace extérieur. Ainsi le phénomène primordial de l'aimantation d'une barre de fer doux dans une hélice nous laisse absolument sans ressource ; toute base nous manque dans les deux analogies, aussi bien avec le fluide visqueux qu'avec le solide élastique. Si c'est un fluide qui doit tourner continuellement, il nous faut des actions à la surface dépendant non de la déformation, mais de la vitesse de rotation. Si nous prenons notre solide élastique de comparaison, nous devons avoir un équilibre statique, la partie intérieure étant déviée d'un angle plus grand que l'angle dont a tourné, tout en se déformant, la matière extérieure au fer. Il suffit de compléter la déformation de la partie extérieure par un déplacement circulaire sans rotation, pour satisfaire à la condition qu'il n'y ait pas de glissement à la surface de contact. Ainsi nous devons avoir un arrangement de matière dans lequel un couple constant produit un déplacement angulaire constant d'un corps et ne produit pas une rotation continue. La seule chose qui puisse produire ce résultat, c'est une rotation inhérente et préexistante dans les molécules de matière. Il semble bien que ce soit la seule chose capable de le faire, et en tout cas il est certain que cela *peut le faire;* car le gyrostat nous montre la chose réalisée.

» Je vais finir, si vous permettez, par une expérience gyrostatique simple, une vieille expérience gyrostatique, bien

connue, que je mets sous vos yeux, parce que j'en ai besoin pour établir solidement l'application que j'en veux faire.

» Je vais vous montrer par cette expérience, en la rapportant à l'idée d'un milieu, une matière qui a les propriétés d'un fluide incompressible et n'a aucune rigidité en dehors de celle que lui communiquent les actions gyrostatiques. Voici, pour ainsi dire, un squelette moléculaire qui peut nous fournir un tel fluide. C'est un damier de carrés rigides, dont les coins voisins sont reliés par une corde flexible inextensible, qui passe sans frottement à travers des trous, ou sur des poulies montées aux sommets. Voici un modèle ainsi construit (*fig.* 68), vingt-cinq carrés rigides et trente-six morceaux

Fig. 68.

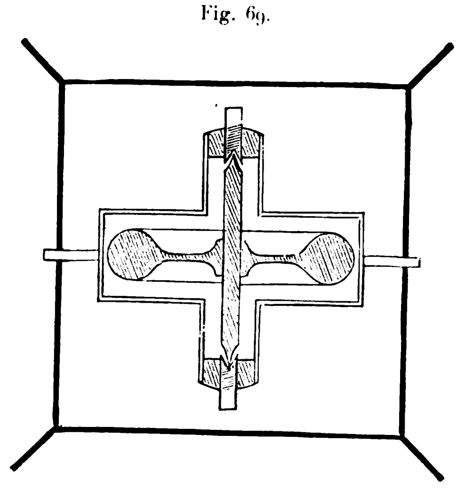


de corde sans fin, réunissant les coins et formant une sorte de tissu. Prenons un tissu ordinaire, et tirons-le dans divers sens. Dans la direction de la trame et dans la direction de la chaîne, nous ne pouvons pas l'allonger; mais, à 45° de la chaîne et de la trame, nous l'étirons très facilement. C'est facile à comprendre, et vous savez comment les chirurgiens en profitent, en coupant leurs bandages en biais. Notre tissu

est différent : il s'étire avec la même facilité en tous sens et il a pourtant une surface constante; pour les déplacements très petits, pas pour les grands. Le contour de chaque carré rigide et de chaque carré flexible est donné; et dans ce cas, si l'on déforme le carré en un rectangle non carré ou en un parallélogramme, la surface reste sensiblement constante. Dans quelque sens qu'on tire, la surface éprouve d'abord une diminution; mais celle-ci est proportionnelle au carré de la tension, ce qui permet de dire dans le langage infinitésimal que l'aire ne change pas. La constance de la périphérie de chacun de ces contours entraîne donc la constance approximative de l'aire. Ainsi, dans ce squelette, nous avons un modèle à deux dimensions d'un milieu d'aire invariable, qui est extensible sans résistance dans une direction quelconque, pourvu qu'on le laisse se rétrécir proportionnellement dans la direction perpendiculaire.

» Maintenant mettons un gyrostat dans chacun de ces carrés (*fig.* 69), et nous avons tout ce qui est nécessaire pour satis-

Fig. 69.



faire à la condition étrange et presque inconcevable qu'exige le modèle dynamique d'aimantation induite dans le fer, auquel j'ai fait allusion tout à l'heure.

» 21. Je vais faire une expérience qui montre bien cette propriété, si cela ne prend pas trop de temps (Sir W. Thomson fit alors tourner le gyrostat). Je tourne autour d'une verticale le cadre carré que je tiens : d'abord dans un sens, et l'extrémité rouge du support de l'axe de la poulie se relève; je tourne en sens opposé, c'est l'extrémité bleue qui se relève. Le gyrostat est monté dans un cadre carré comme vous voyez; je le tiens dans ma main. La boîte rigide qui porte l'axe de la poulie est, comme vous voyez, libre de tourner autour de l'axe de ces tourillons fixés horizontalement sur des supports dans deux côtés opposés du cadre que je tiens. L'axe de ces tourillons est perpendiculaire à l'axe du volant. Je dois tourner à droite sans m'arrêter, pour maintenir l'extrémité rouge en haut. Je tourne à gauche et l'extrémité bleue se relève. C'est une expérience d'un bien curieux intérêt. Voici trois petits objets sur un plateau. Imaginez que ce soit un plateau de sommelier avec des verres à liqueur représentés par ces bouchons de caoutchouc. Tant que je tourne ainsi lentement à ma gauche, tout va bien; si je vais tout droit, c'est incertain; mais, si je tourne si peu que ce soit à ma droite, le plateau se retourne et tout tombe.

» 22. Regardez maintenant le gyrostat, qui repose sur ses tourillons, l'axe des tourillons et celui du volant, tous deux horizontaux à présent. Le cadre carré extérieur semble inébranlable en azimut. Quand j'applique un couple pour le mouvoir en azimut, il ne bouge pas; mais le gyrostat tourne autour de l'axe des tourillons, et oriente l'axe de son volant perpendiculairement au plan dans lequel j'essaye de faire tourner le cadre; et il faut que j'applique un couple dont l'intégrale par rapport au temps est égale au double du *moment de rotation* du volant, avant de pouvoir amener le gyrostat de la position où le bleu est en haut à celle où le rouge est en haut.

» 23. Cette boîte fermée, contenant un volant en rotation rapide monté sur un axe intérieur, s'appelle un *gyrostat*, parce que, en vertu de sa rotation, elle se tient, de quelque

manière qu'on la pose par un de ses côtés sur une table dure polie. Vous le voyez, n'importe comment je la place, elle ne tombe pas. Je la place avec son centre de gravité au-dessus du point d'appui, elle reste en repos; avec son centre de gravité un peu en dehors de la verticale du point d'appui, elle tourne autour en azimut, *mais ne tombe pas.*

» 24. Maintenant supposez qu'on ait monté un gyrostat dans chaque carré rigide du tissu, exactement comme celui-ci est monté dans le cadre carré que je tiens. Si la vitesse des volants est assez grande, chacun de ces carrés rigides est pratiquement inébranlable en azimut. Je ne dis pas qu'il est inébranlable, je dis que vous pouvez le rendre tel pratiquement, en rendant la vitesse du volant assez grande.

» 25. Nous avons ainsi le squelette d'un modèle de solide élastique spécial, dans la construction duquel les actions gyrostatiques engendrent la rigidité. Et n'allez pas vous figurer qu'un tel modèle est trop grossier pour être instructif! Regardez la structure des êtres vivants; pensez à tout ce que nous devons expliquer en électricité et en magnétisme; et accordez, au moins, qu'il doit y avoir dans les dernières molécules des corps magnétiques conducteurs ou non, et des corps non magnétiques, une espèce de structure par laquelle les propriétés merveilleuses que nous connaissons sans les expliquer trouveront leur explication. Nous ne devons pas supposer que toute la matière inanimée est vide, et sans forme, et sans structure : ses molécules ont une forme; elles sont en relation les unes avec les autres.

» 26. Aussi ne puis-je admettre que ce soit se livrer à une simple récréation théorique, mais, bien au contraire, fournir un secours puissant pour la conception des choses possibles, que de montrer, par un modèle, même grossier et impraticable, qu'on peut fabriquer une structure, qui est un liquide incompressible et sans frottement, tant qu'aucun appareil gyrostatique n'y est placé, et qui acquiert une élasticité de rotation, une rigidité toute particulière, comme effet de l'introduction

de gyrostats dans ces carrés. Imaginez un modèle du même genre, à trois dimensions, avec des cubes rigides au lieu des carrés que vous avez sous les yeux [1]. Au lieu des cordes flexibles sans fin, que vous voyez, imaginez des liens élastiques entre les sommets voisins des cubes. Dans chaque cube, montez trois gyrostats dont les lignes des coussinets soient parallèles aux trois côtés. L'empire gyrostatique, ainsi assuré, rend les cubes pratiquement inébranlables en rotation, mais les laisse entièrement libres pour tout mouvement de translation. Nous avons ainsi un corps qu'il serait impossible de distinguer d'un solide élastique ordinaire, pour toute déformation sans rotation et pour tout mouvement de translation de l'ensemble, mais qui résiste à toute tentative de rotation. Il ne sera pas inébranlable pour les rotations; mais il sera maintenu à une déviation angulaire déterminée par un couple constant. Ainsi, sur ce solide, l'effet d'un couple constant n'est pas de produire une rotation continuelle, mais de produire et maintenir un déplacement angulaire constant; et cela, pendant un temps très long, si le moment de rotation des volants est assez grand.

» 27. Maintenant, pour finir, je me bornerai à vous dire que cette rigidité de rotation de l'éther doit être la même dans le cuivre et tous les autres métaux non magnétiques, ainsi que dans l'air et les autres isolants; mais que dans le fer elle est incomparablement *moindre*. Ces conditions sont très exactement celles qu'il nous fallait pour les relations entre l'éther de l'air et du fer à l'intérieur de l'hélice d'un électro-aimant. Mais, hélas! nous voilà maintenant acculés à d'insurmontables difficultés. C'est par des déplacements relatifs des aimants et des fils parcourus par les courants qu'a été révélée à Œrsted et à Ampère l'existence de la force électromagnétique; ce fait fondamental, le mouvement de l'aimant ou du fil, comment peut-il s'expliquer au moyen de déformations de l'éther élastique et solide, entre ces deux corps? Comment se fait-il que ces actions ne s'équilibrent pas d'elles-mêmes dans l'éther solide? Comment peut-il exister un solide capable de donner

---

[1] *Voir* Note suivante.

naissance à cet état merveilleux qu'on trouve dans l'air entre les pôles d'un électro-aimant; état tel, par exemple, qu'une pièce de cuivre y tombe avec une vitesse qui n'atteint peut-être pas un quart de centimètre par seconde? Regardez le sujet avec des yeux d'ingénieurs. Songez à la « résistance des matériaux » qu'il faut supposer à l'éther contenu dans l'air, les molécules d'air courant en tous sens avec des vitesses de près de 500 mètres par seconde, plus ou moins, selon la température; et pensez aux forces atteignant 110 kilogrammes par centimètre carré, qui mesurent l'attraction mutuelle de deux barres de fer aimantées à 1700 unités C.G.S., séparées par une mince couche d'air, et aux 46000 unités C.G.S. de force magnétique constatée par Ewing dans l'air environnant. Comment se fait-il que ces forces prodigieuses soient développées dans l'éther, solide élastique, et que cependant les corps pondérables soient parfaitement libres de se mouvoir à travers ce solide? Je vous dirai seulement que tous les efforts d'imagination sur ce sujet ne nous donnent qu'une théorie dynamique partielle. J'ai absolument, je ne dirai pas ignoré, puisque j'en ai parlé deux ou trois fois, mais laissé de côté la partie électrostatique, celle qui a été la première connue, notre première passion; nous la laissons absolument de côté, nous n'y touchons pas. Nous n'avons pas avancé d'un pas vers l'explication des actions mutuelles entre corps électrisés; dans aucune de nos représentations ou de nos tentatives d'explication nous n'avons été près de réaliser l'attraction mutuelle entre le fer d'un électro-aimant, ou l'acier d'un aimant permanent, et son armature; nous n'approchons pas d'une explication de la possibilité des mouvements des corps qui montrent ces forces. Nous essayons seulement d'expliquer, pour un système en repos de conducteurs et d'isolants, la distribution variable des courants électriques dont nous connaissons l'existence par la théorie mathématique et l'expérience.

» **28.** Et maintenant, j'en suis effrayé, je dois finir en déclarant que les difficultés sont si grandes pour former quelque chose qui ressemble à une théorie compréhensive, que nous ne pouvons même pas apercevoir le moindre écriteau tourné

vers une route qui puisse nous conduire à une explication. Non, ce n'est pas trop dire; j'affirme seulement que nous ne pouvons pas actuellement l'imaginer. Mais dans un an, dans dix ans, dans cent ans, il n'y aura probablement pas plus de difficultés que nous n'en trouvons à comprendre ce verre d'eau, qui paraît maintenant si clair et si simple. Je n'ai aucun doute que ces choses, qui nous semblent si mystérieuses, ne seront plus des mystères du tout, que les écailles nous tomberont des yeux; que nous apprendrons à voir autrement les choses; qu'alors tout ce qui est actuellement difficulté sera tout simplement le bon sens et la manière intelligible d'aborder le sujet [1].

» Je vous prie de m'excuser de vous avoir conduits à l'aveu d'une telle impuissance à pénétrer si peu que ce soit au-dessous de la surface de ce grand sujet, qui constitue le domaine de l'Institution des Ingénieurs électriciens. »

---

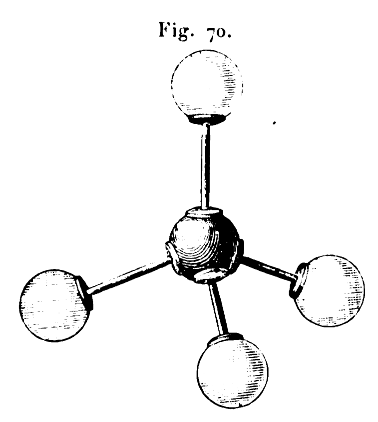
[1] La bonne voie n'est peut-être pas si difficile à découvrir; il faut tenir compte des réactions mutuelles de l'éther et de la matière, et ne pas se borner aux actions linéaires; la mobilité des corps ordinaires à travers l'éther solide élastique peut être obtenue, — comme celle d'une goutte d'eau à travers la glace — en admettant que la présence de la matière ordinaire rend l'éther liquide ou plastique, ce qui s'exprime par des conditions un peu plus compliquées que celles indiquées pour un seul corps, dans un Mémoire aux *Annales de l'École Normale* (décembre 1890). On approche ainsi beaucoup d'une explication mécanique complète de l'Électrostatique, comme je le montrerai dans une prochaine publication. (M. B.)

NOTE VI.

Sur une constitution gyrostatique adynamique pour l'éther. (§ 1-6. Note de Sir W. Thomson dans les *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, sept. 1889) (§ 7-15. *Proc. Roy. Soc. Ed.*, 17 mars 1890.)

« **1.** Considérons un double assemblage d'atomes noirs et blancs constitué de la manière suivante : les atomes blancs forment un assemblage tétraédrique régulier, comme les centres de sphères égales disposées en pile de boulets aussi condensée que possible; les atomes noirs forment un assemblage identique et parallèle, chaque atome noir occupant le centre de gravité du tétraèdre des atomes blancs voisins et réciproquement. Annulons toutes les forces d'attraction et de répulsion entre les atomes. Joignons chaque atome noir à son voisin blanc par un barreau rigide, comme dans le petit modèle que représente la *fig.* 70. Nous aurons ainsi, aboutis-

Fig. 70.



sant à chaque atome noir et à chaque atome blanc, quatre barreaux faisant entre eux des angles obtus, tous égaux à

$$\pi - \text{arc}\cos\tfrac{1}{3}.$$

» 2. Supposons que chaque atome soit une petite sphère, au lieu d'être un point; que chaque barreau soit muni, à ses extrémités, de calottes sphériques qui lui sont rigidement fixées et qui s'appliquent sur la surface des sphères et restent libres de glisser sur ces surfaces sans pouvoir les quitter. Nous aurons réalisé ainsi une structure moléculaire articulée qui, en gros, constitue un quasi-liquide parfait, incompressible. Les déformations ne doivent être qu'infiniment petites; et de telles déformations exigent des diminutions de volume infiniment petites du second ordre, proportionnelles à leurs carrés, que nous négligeons. C'est à cause de cette limitation que nous n'avons pas un liquide parfait incompressible, sans la qualification « quasi ». Mais cette limitation n'altère en rien la perfection de notre éther, quant à sa propriété de transmettre les ondes lumineuses.

» 3. Maintenant, pour donner à notre structure la quasi-élasticité qui lui est nécessaire pour produire les vibrations des ondes lumineuses, attachons à chaque barreau un double appareil gyrostatique composé de deux gyroscopes de Foucault, installés suivant les instructions qui suivent.

» 4. Au lieu du barreau simple, prenons un barreau dont la partie centrale, sur un tiers de sa longueur par exemple, soit composée de deux anneaux dans des plans perpendiculaires l'un à l'autre, de manière qu'un diamètre de chaque anneau coïncide avec l'axe du barreau. Prenons ces deux anneaux pour les anneaux extérieurs des gyroscopes (*fig.* 69) et montons les axes des anneaux intérieurs perpendiculairement à la ligne du barreau. Plaçons maintenant les anneaux intérieurs avec leurs plans dans les plans des anneaux extérieurs, et conséquemment avec les axes de leurs volants suivant l'axe du barreau. Donnons des vitesses de rotation égales, mais en sens contraires, aux deux volants.

» 5. Le double appareil gyrostatique ainsi constitué (c'est-à-dire ainsi construit et ainsi mis en mouvement) a cette propriété singulière qu'il faut, pour dévier le barreau, un



couple de Poinsot L, appliqué dans un plan contenant l'axe du barreau. Ce couple est proportionnel à l'inclinaison i de la direction nouvelle du barreau sur sa direction primitive, à la condition que la durée de l'application du couple L soit assez courte pour que les angles variables des axes des volants avec la direction du barreau restent infiniment petits.

Nous avons, en effet, comme il est facile de le démontrer par la théorie du gyroscope,

$$L = \frac{(mk^2\omega)^2}{\mu} i,$$

m désignant la masse d'un des volants;

mk^2 étant son moment d'inertie;

ω étant sa vitesse angulaire;

μ étant le moment d'inertie, autour de l'axe des pivots, de l'anneau intérieur, de la masse entière (anneau et volant) qu'ils soutiennent.

» 6. Notre structure articulée, dont les barreaux, placés entre les atomes noirs et les atomes blancs, sont munis des appareils gyrostatiques, n'est plus, comme auparavant, sans rigidité; mais elle a une rigidité tout à fait particulière, qui n'est pas comme la rigidité des solides élastiques ordinaires, dont les forces d'élasticité dépendent seulement des déformations qu'ils éprouvent. Au contraire, ses forces dépendent directement des rotations absolues des barreaux et ne dépendent des déformations que parce que celles-ci sont des conséquences cinématiques des rotations des barreaux. Cette relation des forces quasi élastiques avec les rotations absolues est justement ce dont nous avons besoin pour l'éther, et surtout pour expliquer les phénomènes de l'électrodynamique et du magnétisme.

» 7. L'assemblage ainsi constitué, intéressant comme modèle d'une espèce spéciale d'élasticité quasi solide, due à la rotation d'une matière qui n'a d'autre propriété que l'inertie et la rigidité, ne satisfait pas exactement aux conditions de



l'art. XCIX, § 14 (Note IV). La déformation sans rotation de la substance ou de l'assemblage regardé comme un assemblage homogène de points doubles entraîne inexorablement la rotation de quelques-unes des barres de liaison et, par conséquent, exige des actions extérieures compensatrices. Dans l'*éther imaginaire* aucune action ne doit être nécessaire pour produire une déformation sans rotation et tout déplacement soit de pure rotation, soit de rotation avec déformation, doit exiger un couple constant, proportionnel à la rotation seule, et autour du même axe. Dans une Communication à la Société Royale d'Édimbourg, il y a un an, je proposai le problème de construire un modèle à joints, commandé par les actions gyrostatiques et remplissant les conditions de n'avoir aucune rigidité contre les déformations sans rotation, mais d'opposer à la rotation, ou à la déformation accompagnée de rotation, une résistance quasi élastique, proportionnelle à la rotation. Je donnai une solution illustrée par un modèle pour le cas de points mis dans le même plan (Note V), mais je ne voyais pas alors de solution très simple à trois dimensions; après beaucoup d'efforts infructueux, j'ai récemment trouvé la solution suivante.

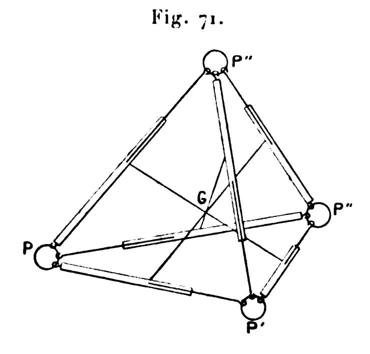
» 8. Prenez six tiges droites et six tubes droits de même longueur, dont le diamètre interne soit exactement égal au diamètre extérieur des tiges. Attachons-les tous par un bout à un point P, de manière que les axes des six tiges et des six tubes passent exactement par le point P; mécaniquement cela pourrait se faire au moyen de douze calottes sphériques appliquées sur une même sphère.

» Fabriquons un grand nombre de faisceaux pareils et, pour commencer, plaçons les sommets de manière à constituer un assemblage homogène équilatéral de points P, P′, ..., chacun réuni à ses douze voisins immédiats par une tige qui glisse à frottement doux dans le tube de l'autre. Appelons cela l'assemblage primaire; ces connexions mécaniques n'imposent *aucune liaison;* chaque point peut être déplacé arbitrairement en tous sens, les autres restant en repos. Ces connexions n'ont été établies qu'en vue de nous fournir des lignes

ou plutôt des surfaces cylindriques *rigides* allant d'un point à l'autre.

» Faisons maintenant une charpente rigide G (*fig.* 71) de trois tiges à angle droit autour d'un point, plaçons-la de façon que ses trois tiges s'appuient sur les trois paires de côtés rigides d'un tétraèdre quelconque (PP′, P″P‴)(PP″, P′P‴) (PP‴, P″P′) de notre assemblage primaire. Plaçons de même d'autres charpentes rigides semblables, G′, G″, sur les côtés

Fig. 71.



de tous les tétraèdres qui correspondent à ceux déjà choisis. Les centres de ces charpentes forment un second assemblage homogène, placé par rapport aux points P comme les blancs par rapport aux noirs (§ 1).

» 9. La position de la charpente G, c'est-à-dire son orientation et la position de son centre (six variables), est complètement déterminée par les quatre points P, P′, P″, P‴ (Thomson et Tait, *Nat. Phil.*, § 198). Si on laissait les barres s'écarter des trois paires de côtés du tétraèdre, nous pourrions prendre pour ses six coordonnées, les six distances de ses trois barres aux trois paires de côtés, mais nous les supposons astreintes à rester en contact (¹); maintenant supposons qu'un ou plusieurs des points P, P′, P″, P‴ se meuvent d'une manière arbitraire; la position de la charpente G est toujours entière-

(¹) Par exemple, en terminant chacune des tiges de G par un anneau qui peut glisser sans jeu sur la tige à coulisse correspondante.

ment déterminée. C'est ce que fait bien voir un modèle joint à cette Communication, montrant un seul tétraèdre de l'assemblage primaire et une seule charpente G; les côtés du tétraèdre sont de fil de cuivre glissant dans des tubes de verre; les fils et les tubes ont une boucle au bout, qui permet de réunir par un anneau les trois qui aboutissent à un même sommet, deux des anneaux ont deux tubes de verre et un fil de cuivre, tandis que les deux autres ont deux fils de cuivre et un tube de verre.

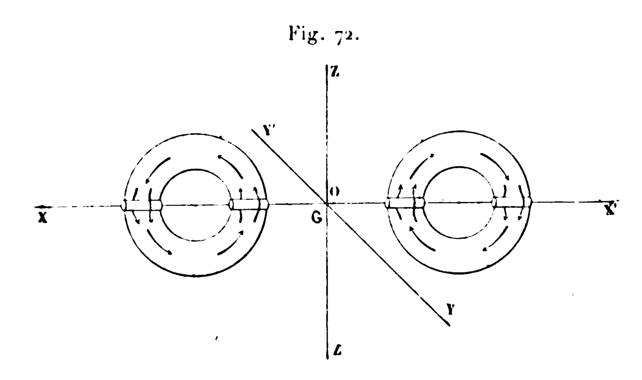
» **10.** Revenons maintenant à notre assemblage multiple. Déformons-le en allongeant tous les côtés parallèles à PP′ sans rotation de PP′ ni de P″P‴. C'est une déformation homogène sans rotation de l'assemblage primaire. Les charpentes GG′ subissent seulement des mouvements de translation sans rotation, comme on le voit facilement en portant son attention sur G et sur le tétraèdre PP′P″P‴. Considérons de même cinq autres déplacements par allongement parallèle aux cinq autres côtés du tétraèdre. Toute déformation homogène infiniment petite de l'assemblage primaire (§ 8) peut être décomposée d'une seule manière en six allongements simples, et toute déformation infiniment petite avec rotation peut être produite en superposant une rotation sans déformation à la déformation sans rotation. Ainsi toute déformation homogène infiniment petite produit seulement un mouvement de translation sans rotation des charpentes G, et tout déplacement homogène infiniment petit de l'assemblage primaire produit une rotation de chaque charpente égale à la sienne propre et autour du même axe.

» **11.** Il ne reste plus qu'à donner aux charpentes G une stabilité de *rotation*, ce qu'on peut faire en montant convenablement des gyrostats (comme cela est indiqué page 155, *Conf.*); trois gyrostats suffiraient; mais il en faut douze pour obtenir la symétrie et pour supprimer tout moment résultant des volants montés sur une même charpente. Au lieu de gyrostats ordinaires, avec des volants rigides, nous pouvons prendre des gyrostats liquides, comme cela est indiqué ci-

dessous, et nous débarrasser du grossier mécanisme des roues, des axes et des pivots huilés; mais je choisis ici le gyrostat liquide tout simplement parce que la description en est plus facile.

» 12. Figurez-vous un anneau creux, un tore, c'est-à-dire un tube circulaire sans fin dont la section droite est circulaire. Perforez-le suivant un diamètre et plantez deux tubes pour fermer la perforation, comme le montre la *fig.* 72.

Fig. 72.



» Remplissez-le d'un liquide sans frottement, et donnez au liquide un mouvement de circulation sans rotation (¹) comme l'indiquent les flèches. Cette disposition est l'équivalent hydrodynamique de nos volants mécaniques. Fixons-le sur une tige solide qui passe à travers la perforation diamétrale, et voilà notre gyrostat monté, le gyroscope de Foucault qu'il nous faut pour notre modèle. En nous reportant aux §§ 3, 4, nous voyons combien son emploi aurait simplifié et abrégé les descriptions, qui y étaient données uniquement parce qu'elles décrivent un mécanisme réel au moyen duquel les exigences de notre modèle peuvent être pratiquement réalisées d'une manière très intéressante et très instructive, comme on l'a vu Note V.

(¹) Il faut pour cela que la vitesse linéaire du liquide soit *inversement* proportionnelle à la distance à l'axe de révolution du tore.

(M. B.)

» **13.** Soient XOX', YOY', ZOZ' les trois barres de la charpente G. Sur chacune montons quatre de nos gyrostats liquides, comme nous allons l'indiquer pour XOX'. Des quatre anneaux montés sur XX', deux doivent être placés dans le plan de XX', YY' et les deux autres dans le plan XX', ZZ'. La circu quides doit se faire en sens inverse dans chaque paire.

» **14.** Appliquons le principe gyrostatique établi § 5 à notre charpente G, avec les douze gyrostats liquides ainsi montés : si, à partir de la position initiale avec tous les anneaux en repos, on tourne cette charpente d'un *petit* angle i autour d'un axe quelconque, il faut, pour la maintenir en repos dans cette position déviée, appliquer un couple proportionnel à i. Cette proportionnalité se conserve sensiblement, tant que les plans de tous les gyrostats ne font qu'un très petit angle avec leur direction première. Ainsi, avec cette restriction relative au temps, notre assemblage primaire homogène de points, réunis par les charpentes G, G', ... que commandent les gyrostats, satisfait exactement à la condition établie pour l'éther idéal. Si la vitesse du mouvement du liquide dans chaque gyrostat est extrêmement grande, le système oppose une résistance infinie à la rotation autour d'un axe quelconque, et si les barres et les tubes qui forment les côtés du tétraèdre et les barres des charpentes G sont tout à fait rigides, l'assemblage primaire ne peut subir aucune rotation, ni aucune déformation accompagnée de rotation; mais, s'il y a quelque trace d'élasticité de flexion dans les côtés du tétraèdre ou dans les barres des charpentes G, ou dans toutes, l'assemblage primaire satisfait à la définition de la rigidité gyrostatique sans aucune limite relative au temps, c'est-à-dire avec une persistance parfaite de sa rigidité quasi élastique.

» **15.** Un assemblage homogène de points avec quasi-rigidité gyrostatique fournie par le procédé qu'on vient d'indiquer et construit à échelle suffisamment petite transmettrait les vibrations de lumière exactement comme fait l'éther naturel. Il serait incapable de transmettre des ondes de con-

densation parce qu'il est absolument dépourvu de résistance à la condensation ou à la raréfaction. En fait, c'est une réalisation mécanique du milieu auquel j'ai été conduit par de pures raisons d'optique il y a un an et demi (nov. 1888), en partant de la théorie originale de Green et m'efforçant d'expliquer les résultats des observations sur [illegible] et la réfraction de la lumière. »

NOTE VII.

Réfutation de la doctrine de Maxwell-Boltzmann au sujet de la distribution de l'énergie cinétique. — Exemple décisif,

PAR

LORD KELVIN

(Sir W. Thomson)

(*Proc. Roy. Soc.*, 28 avril 1892).

« La doctrine en question est celle qu'énonce Maxwell en ces termes :

» *Dans l'état final du système, l'énergie cinétique moyenne de deux portions données du système sera dans le même rapport que le nombre de degrés d'indépendance de ces deux portions* (*nombre de variables géométriques distinctes nécessaire pour définir leur forme*). [*Sur la distribution moyenne de l'énergie dans un système de points matériels* (*Cambr. Phil. Soc. Trans.*, 6 mai 1878), réimprimé dans le tome II des *Mémoires scientifiques de Maxwell.*]

» Supposons que le système soit formé de trois corps A, B, C, tous mobiles suivant une même droite KHL :

» B oscille sous l'action d'un ressort assez dur pour que l'amplitude reste petite, même s'il arrive que toute l'énergie du système s'y accumule.

» A, C ont des masses égales.

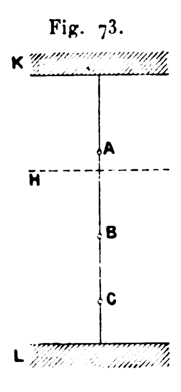
» C n'est soumis à aucune force, sauf lorsqu'il choque la paroi fixe L et lorsqu'il choque B ou en est choqué.

» A n'est soumis à aucune force, sauf au moment où il choque B et lorsqu'il se rapproche d'une paroi fixe K; celle-ci exerce une action répulsive quelconque, constante ou non dans toute l'épaisseur HK, mais qui devient infiniment grande, si A arrive infiniment près de la paroi.

» Supposons tous ces corps animés d'un mouvement de va-et-vient. *Les chocs entre* B *et les deux corps égaux* A, C *vont*

produire et maintenir l'égalité entre la valeur moyenne de l'énergie cinétique de A, *mesurée soit immédiatement avant le choc, soit aussitôt après le choc, et l'énergie cinétique moyenne de* C. Alors, si l'on tient compte du temps passé par A dans la région HK, la valeur moyenne de la *somme de l'énergie potentielle et de l'énergie cinétique* de A est égale à l'énergie cinétique moyenne de C. Mais l'énergie potentielle de A est positive en tous les points de l'espace HK; car, par suite de notre hypothèse des actions répulsives, la vitesse

Fig. 73.



de A est diminuée tant que le mouvement est dirigé de H vers K et augmentée pendant le mouvement inverse. L'énergie *cinétique* moyenne de A est donc moindre que l'énergie cinétique moyenne de C.

» C'est un exemple très caractéristique pour la théorie de la température, et qui correspond à la supposition que la température d'un solide ou d'un liquide est égale à l'énergie cinétique moyenne de chaque atome : hypothèse traitée par Maxwell comme une conséquence de son prétendu théorème, et qui, soi-disant établie ainsi, a été généralement regardée et employée bien à tort comme une proposition fondamentale de la Thermodynamique.

» C'est seulement pour un gaz sensiblement *parfait*, c'est-à-dire une réunion de molécules dont chacune se meut pendant un temps relativement long en ligne sensiblement droite, et subit des changements de direction et de vitesse par des

chocs de durée excessivement brève, et c'est seulement pour l'énergie cinétique des mouvements de *translation* des molécules du gaz parfait, que la température est égale à l'énergie cinétique moyenne de chaque molécule, comme l'ont supposé d'abord Waterston, puis Joule, et comme Maxwell l'a prouvé le premier. »

J'ai cru devoir ajouter la traduction complète de cette dernière et toute récente Note de Lord Kelvin sur cette question si intéressante de la définition mécanique de la température. Les esprits sont actuellement très partagés sur l'importante proposition de Maxwell-Boltzmann, dont, sans nul doute, l'énoncé même manque de précision dans l'énumération des conditions nécessaires. On voit que Lord Kelvin se range décidément parmi les opposants, tandis que Lord Rayleigh réserve son jugement, en restant plutôt favorable. La phrase que j'ai fait imprimer en italiques me paraît un peu rapide, et il ne me semble pas évident qu'il doive s'établir un état permanent moyen indépendant de l'état initial. Supposons, en effet, que le point C soit en repos n'importe où, entre L et B, et le point A en mouvement : un état permanent pourra s'établir, dans lequel le corps B oscillera plus ou moins régulièrement autour d'une position moyenne, différente de sa position d'équilibre, et pour laquelle le ressort qui le maintient est bandé sous l'action des chocs unilatéraux qu'il subit. Ce corps B ne joue pas le rôle d'égaliseur d'énergie que Lord Kelvin lui attribue. Si les deux points A et C ont des énergies initiales inégales, tout ce que la condition de permanence nous apprend, c'est que le ressort qui maintient le corps B se bandera de telle sorte, que la grandeur des chocs individuels puisse être inégale, et que le produit du nombre des chocs par la force vive moyenne au moment du choc acquière une valeur fixe pour chacun des deux points A, C.

Mais on peut préciser et dire : quel que soit l'état initial, on peut toujours faire correspondre à une position donnée de la paroi K une position de la paroi L, telle que le nombre

des chocs de C et de A contre B soit le même et que B oscille autour de sa position d'équilibre naturelle, *sans flexion du ressort,* et joue le rôle d'un piston libre et perméable à la chaleur entre une masse gazeuse et une masse liquide. Alors l'énergie cinétique moyenne de C et de A près de B est la même; tout le reste du raisonnement de Lord Kelvin subsiste, et ses conclusions ne perdent rien de leur force.

Le chemin moyen de A est évidemment plus court que celui de C et d'autant plus que la région HK se rapproche plus de B et que la force répulsive y est plus énergique.

Pour ma part, je reste convaincu que la définition de la température comme une quantité d'énergie potentielle, ou cinétique, totale ou partielle, de la matière ordinaire seule est une erreur. Assez simplement liée aux propriétés thermomécaniques des gaz, la température ainsi définie ne paraît avoir aucun lien avec les conditions d'équilibre par rayonnement dans une enceinte vide de matière. Dans ce dernier cas, l'intervention inévitable de l'éther a conduit M. Boussinesq à une définition de la température toute différente, et trop peu connue, qui me paraît beaucoup plus satisfaisante et féconde : « Pour définir la température en un point d'un corps, imaginons qu'on enlève la matière autour de ce point; la température est la force vive, par unité de volume, de l'éther du vide qui occupe la cavité. » C'est cette définition de la *température,* entièrement satisfaisante au point de vue du rayonnement, qu'il me semblerait important de compléter et de relier au principe de Carnot avec plus de précision que ne l'a fait M. Boussinesq ([1]). (M. B.)

([1]) *Voir* BOUSSINESQ, *Recherches sur les principes de la Mécanique, sur la Constitution moléculaire des corps et sur une nouvelle théorie des gaz parfaits* (*Journal de Liouville,* 1873, t. XVIII, p. 337). « On peut appeler température absolue d'un petit volume d'éther la demi-force vive qu'il possède sous l'unité de masse, ou une quantité proportionnelle à cette demi-force vive. Un corps est dit à une certaine température absolue lorsque ses vibrations n'augmentent ni ne diminuent si l'on vient à le placer dans l'éther à la même température. »

Voir aussi, au point de vue de Clausius, le Rapport de M. Bryan sur le principe de Carnot, au Congrès de l'Association Britannique pour l'avancement des Sciences, 1891.



NOTE VIII.

CONSTRUCTION DE LA COURBE MÉRIDIENNE DES SURFACES CAPILLAIRES. — REMARQUES APPLICABLES AUX COURBES DONNÉES PAR LEUR RAYON DE COURBURE,

PAR

M. BRILLOUIN.

---

1. *Étant donnés le niveau* HH′ (*fig.* 74) *de la surface libre plane d'un liquide, l'axe vertical* VH *de la surface de revolution qui limite une partie de ce liquide, et un point* P *de cette surface, trouver le lieu des centres de courbure* O *de la surface méridienne pour toutes les directions possibles de la normale au point* P.

L'équation de Laplace donne, en appelant PO le rayon de courbure inconnu et tenant compte des propriétés des surfaces de révolution (notations de la p. 20), suivant que le liquide est du côté de l'axe ou de l'autre côté

$$\frac{1}{\text{PO}} + \frac{1}{\text{PN}} = \pm \frac{\text{CH}}{a^2},$$

d'où, en prenant le signe +,

$$\text{PO} + \frac{a^2}{\text{CH}.\text{CP}}\,\text{OM} = \frac{2a^2}{\text{CH}};$$

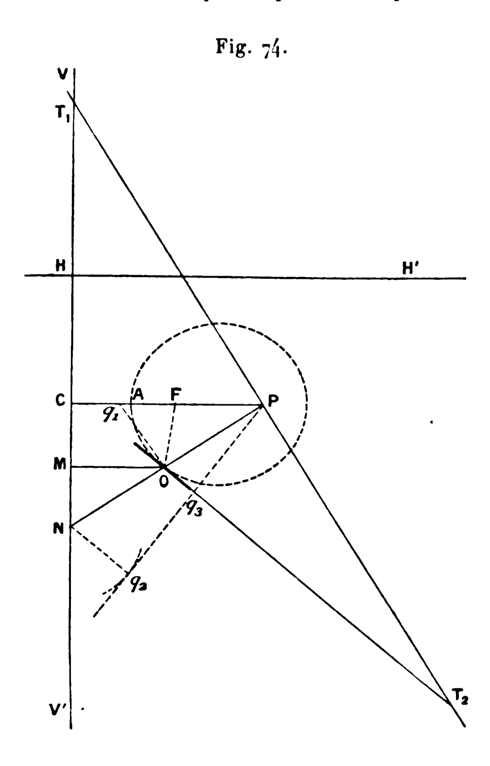
OM, PC sont des perpendiculaires abaissées des points P et O sur l'axe VV′. Cette équation montre que le lieu cherché est une conique dont P est un foyer et VV′ la directrice correspondante à l'autre foyer.

Le demi grand axe a pour longueur $\frac{a^2}{\text{CH}}$. La courbe est une ellipse, une parabole ou une hyperbole, selon que a^2 est inférieur, égal ou supérieur à CH × CP. Le centre est à la distance $\frac{a^4 \times \text{CP}}{\overline{\text{CH}}^2\,\overline{\text{CP}}^2 - a^4}$ du point P, entre P et C.

2. On peut mettre cette propriété à profit sans construire la courbe

entière, quand on connaît à peu près la direction de la normale. Le calcul numérique de la quantité $\dfrac{1}{\pm\dfrac{\mathrm{CH}}{a^2}-\dfrac{1}{\mathrm{PN}}}$ fait connaître PO et le centre de courbure O, dans le cas où PN est la normale exacte. Traçons la tangente en O à la conique ci-dessus définie; son point d'intersection avec toute droite PN_1 menée par le point P, et peu inclinée sur PN,

Fig. 74.



fournit le centre de courbure O_1 correspondant au cas où PN_1 serait la normale. Les deux constructions suivantes peuvent être avantageusement employées suivant l'inclinaison de la normale sur l'axe VV'.

1° Par le point P on mène une normale PT_1 à PN jusqu'à sa rencontre avec l'axe VV'. Sur le prolongement de PT_1, de l'autre côté de P, on porte une longueur PT_2 égale à PT_1 et l'on joint le point T_2 au point O OT_2 est la tangente cherchée au point O.

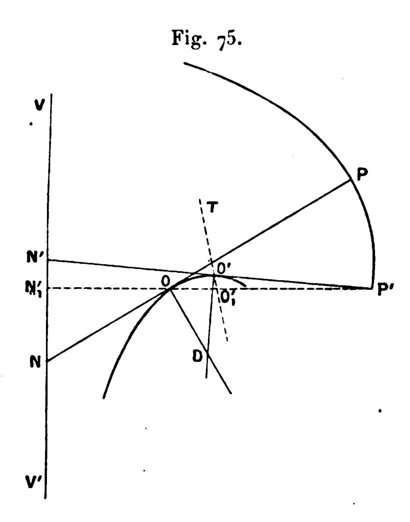
2° Par le point O on mène une normale $\mathrm{O}q_1$ à PN jusqu'à sa ren-

contre avec PC. Du point N, avec Oq_1 comme rayon, on décrit une circonférence, à laquelle on mène une tangente Pq_2 par le point P. Enfin on trace, par le point O, la normale Oq_3 à cette droite Pq_2. Oq_3 est la tangente cherchée.

3. Dans la construction de proche en proche, le maximum de précision ne correspond pas à l'emploi d'un très grand nombre de points intermédiaires, mais à un emploi judicieux d'un nombre de points assez restreint. Or, en partant d'un point où la normale est connue, le tracé d'un arc de circonférence, même de plusieurs degrés d'ouverture, détermine exactement la *position* des points de la courbe méridienne (au troisième ordre près), mais mal la *direction* du dernier élément et de sa normale. Pour continuer la construction, il faut commencer par chercher la vraie direction de la normale. C'est ce que l'on peut faire de deux manières :

1° *Méthode différentielle.* — L'arc de la *développée* (enveloppe des normales) compris entre les centres de courbure O, O' (*fig.* 75) qui cor-

Fig. 75.



respondent à deux points P, P' a une longueur égale à la différence des rayons de courbure PO, P'O', et l'angle correspondant sur la développée est celui des normales PO, P'O'; cela détermine le rayon de courbure de la courbe OO' et permet de la tracer, puisqu'on connaît exactement la normale initiale PO.

On trace de O comme centre avec OP comme rayon un arc de 8° ou 10°

jusqu'en P'. On trace la droite $P'ON'_1$. On cherche le point O'_1 que donnerait l'équation différentielle de la surface si $P'N'_1$ était la normale exacte au point P'. Par le point O'_1 on trace la ligne O'_1T tangente au point O'_1 à la courbe lieu des centres de courbure pour le point P'. Comme l'arc est de petite ouverture, on mesure la corde PP' et l'on prend

$$2\,\frac{(PO - P'O'_1)}{PO + P'O'_1}\,PP'$$

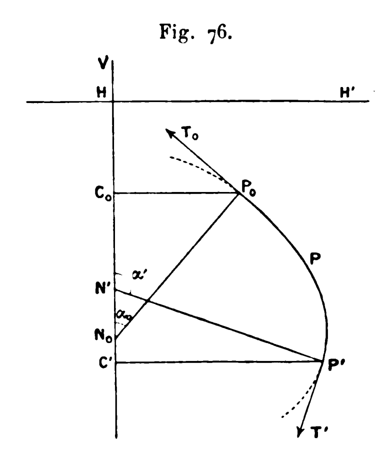
pour rayon de la développée en O; on porte cette longueur sur la perpendiculaire en O à OP, et du centre D ainsi obtenu, on décrit l'arc de développée OO' qui coupe la droite auxiliaire O_1T en O', vrai centre de courbure pour le point P'.

La grandeur angulaire admissible pour l'arc PP' est d'autant moindre que la variation du rayon de courbure est plus rapide; c'est surtout quand la normale PN est à peu près à 45° de l'axe VV' qu'il faut faire attention.

Cette construction est applicable à toutes les courbes données par leur rayon de courbure.

2° *Méthode intégrale.* — On peut utiliser une propriété différente et également généralisable. De toute équation différentielle qui donne le

Fig. 76.



rayon de courbure en fonction des coordonnées d'un point on peut, par une quadrature, tirer une expression de l'angle des tangentes en deux points éloignés au moyen de *toute* la courbe intermédiaire supposée connue (ce n'est donc pas une intégrale première de l'équation diffé-

rentielle). Ici, la théorie de la tension superficielle appliquée directement à la partie de la goutte comprise entre deux plans horizontaux P_0C_0 et $P'C'$ (*fig.* 76) nous fournit l'équation en question

$$\left.\begin{array}{r}\pi\overline{P'C'}^2 \times C'H - 2\pi C'P'a^2\sin\alpha' \\ -\pi\overline{P_0C_0}^2 \times C_0H + 2\pi C_0P_0a^2\sin\alpha_0\end{array}\right\} = V,$$

en appelant V le volume engendré par la révolution du quadrilatère curviligne $C_0P_0PP'C'$ autour de l'axe VV′.

Or on peut soit calculer, soit déterminer au moyen d'intégrateurs convenables, ce volume V, puis calculer au moyen de l'équation la valeur de l'angle α' et la tracer avec un rapporteur, ce qui détermine le point N′, le point P′ étant donné.

Certainement plus compliquée que la première, cette seconde méthode a l'avantage de déterminer l'angle α' au moyen de toute la courbe déjà tracée. L'une pourra servir de contrôle à l'autre. (M. B.)

INDEX ALPHABÉTIQUE.

(Les chiffres **gras** renvoient aux Notes de la fin du Volume.)

A

B

C

D

E

F

G

H

I

J

K

L

M

N

O

P

Q

R

S

T

U

V

W

Y

INDEX MÉTHODIQUE

DES MÉMOIRES ET OUVRAGES CITÉS.

(Les chiffres renvoient aux pages du présent Volume).
(Les titres exacts des Mémoires et Ouvrages sont en *italique*).

Capillarité.

Électricité (Mesures. — Unités. — Questions diverses).

Grandeurs des atomes.

Optique.

Matière. — Tourbillons. — Éther. — Théories de la matière et des gaz.

Les sens.

Le Soleil.

FIN DU TOME PREMIER.

TABLE DES MATIÈRES.

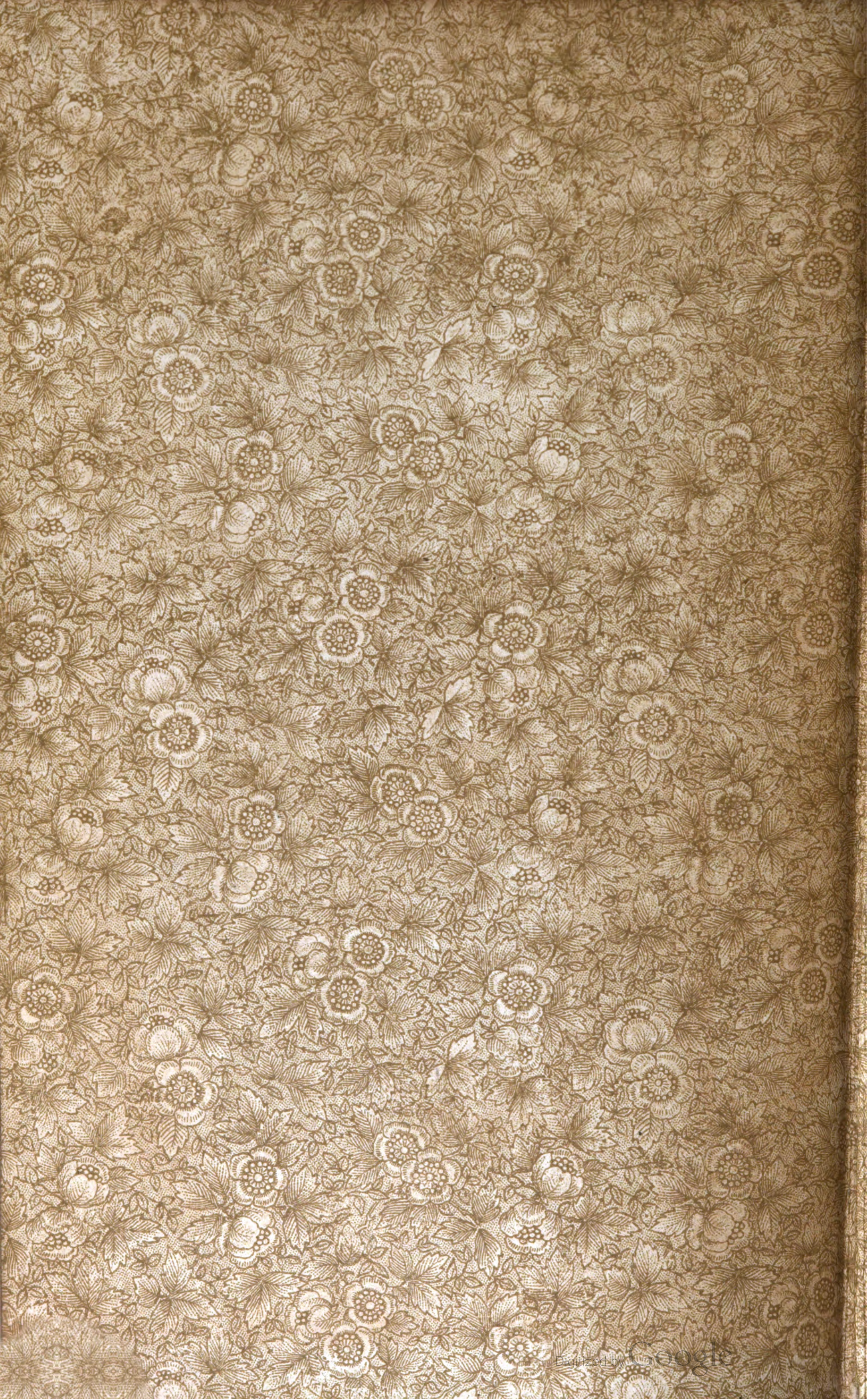
NOTES.

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES DU TOME PREMIER.

ERRATA.

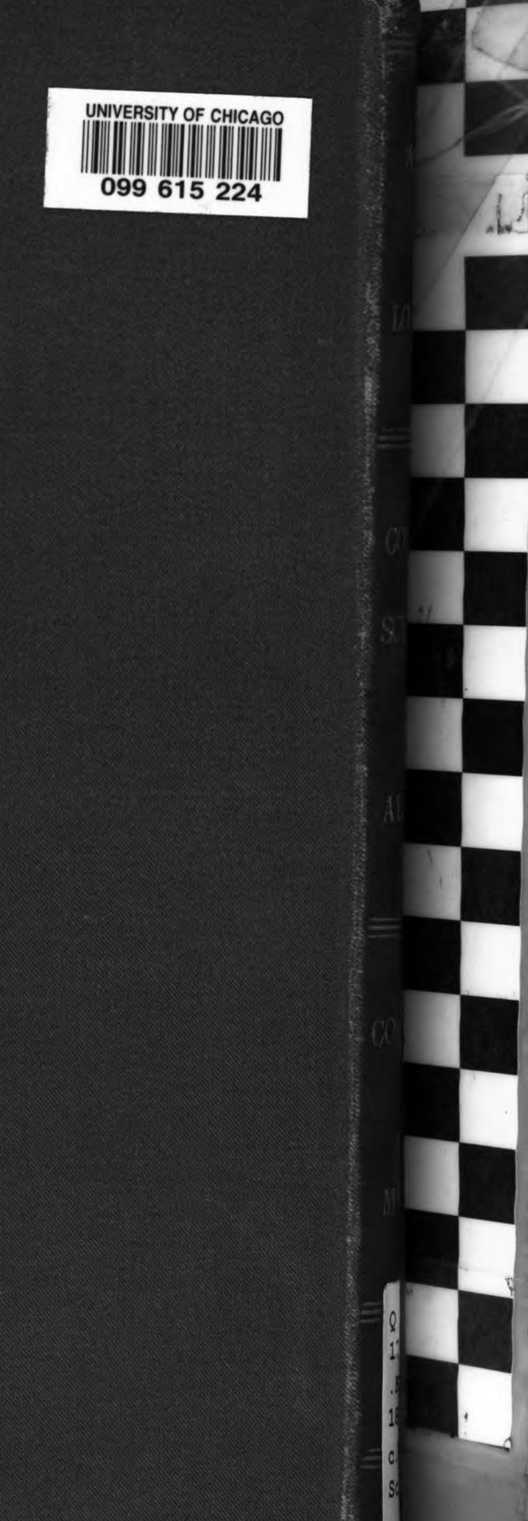
Page 13, note, *ajouter :* M. B.
Page 87, note, *au lieu de :* P. L., *lire :* M. B.
Page 94, note, ligne 3, *au lieu de :* mouvement, *lire :* mouvements.
Page 130, note. Cette note est de Lord Kelvin. Les commentaires qui accompagnent les équations de la page 132 sont de M. Brillouin.
Page 153, note 2, *ajouter :* M. B.
Page 227, note, ligne 2, *au lieu de :* 1864, *lire :* 1854.
Page 240, note, ligne 6, *au lieu de :* 256, *lire :* 257.
Page 266, note, ligne 12, *au lieu de :* 3590, *lire :* 3950.

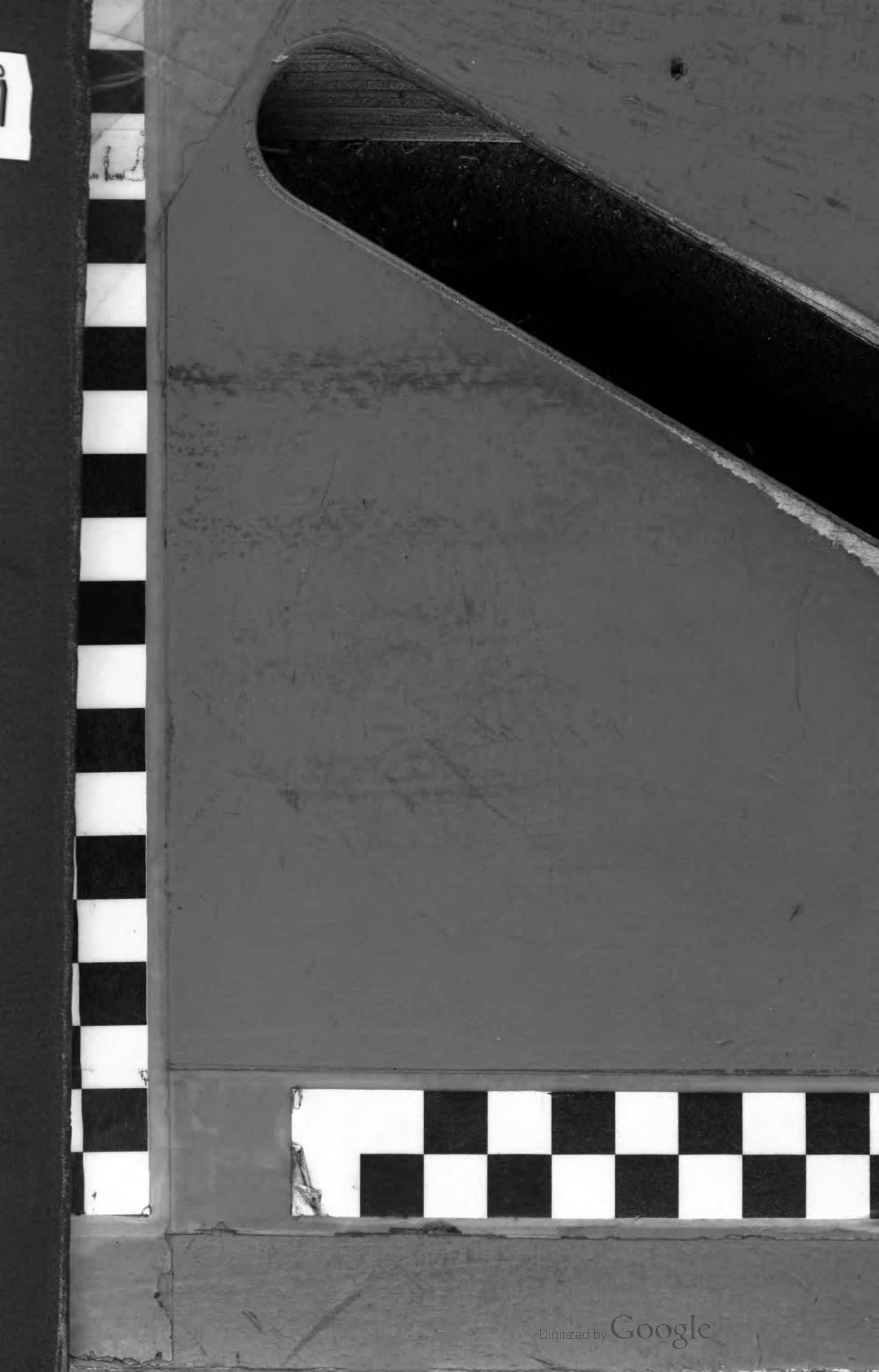
17934 Paris. — Imprimerie GAUTHIER-VILLARS et FILS, quai des Grands-Augustins, 55.



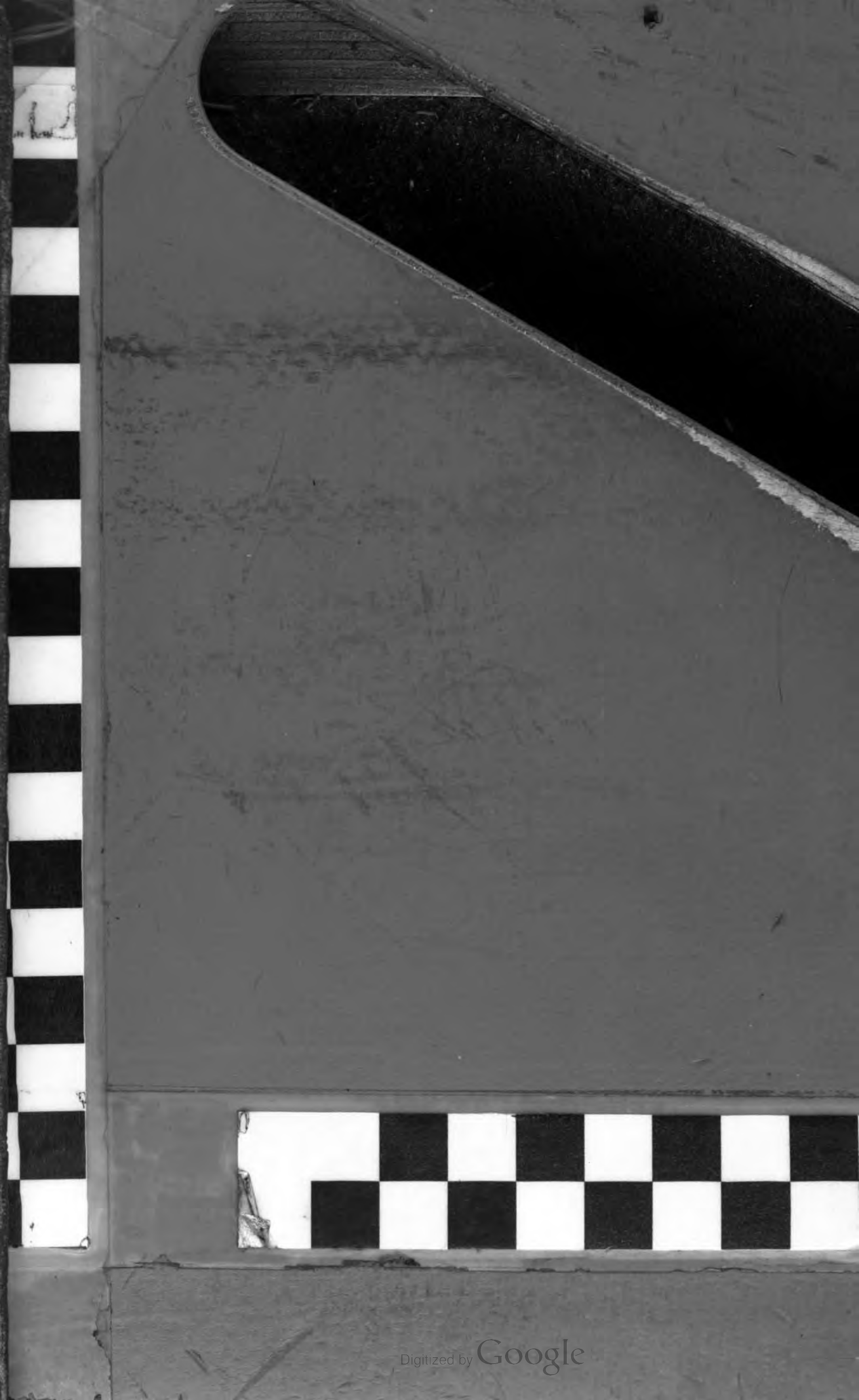



UNIVERSITY OF CHICAGO
099 615 224






UNIVERSITY OF CHICAGO
099 615 224




UNIVERSITY OF CHICAGO
099 615 224